

*Земледелие и мелиорация***Тютюнов С.И., Цыгуткин А.С., Логвинов И.В.**

Урожай сахарной свёклы в зависимости от севооборота, способа основной обработки почвы, доз минеральных и органических удобрений

3

*Растениеводство, защита и биотехнология растений***Енгальчева И. А., Козарь Е. Г., Пронина Е. П., Ушаков В.А.**Иммунологическая оценка нового перспективного сорта бобов овощных (*Vicia faba* L.) Русские белые на устойчивость к наиболее вредоносным фитопатогенам

8

Косолапов В.М., Чернявских В.И., Маринич М.Н.

Семенная продуктивность сортообразцов овсяницы тростниковой газонного направления

13

Илюшко М.В., Гученко С.С., Лебявская В.Н., Безмутко С.В., Ромашова М.В.Устойчивость образцов конкурсного сортоиспытания и сортов риса *Oryza sativa* L. дальневосточной селекции к пирикулярриозу

19

Кинчаров А.И., Дёмина Е.А.

Анализ и краткосрочный прогноз изменения климатических условий в адаптивной селекции яровых зерновых

23

Гончаренко А.А., Черных В.Я., Макаров А.В., Быкова, Н.Ю. Карпушина Е.В., Яшина Н.А.

Многопараметрическая оценка качества зерна популяций озимой ржи с различной вязкостью водного экстракта

31

Колесников Л.Е., Колесников Е.К., Павлюшин В.А., Чернов С.В., Колесникова Ю.Р.

Фенотипическое проявление устойчивости пшеницы к бурой ржавчине: элементы и моделирование

38

*Агрочвоведение и агроэкология***Панов А.В. , Кузнецов В.К., Цыгвинцев П.Н. , Исамов Н.Н.**

Радиационная безопасность агросферы в районах расположения атомных электростанций

47

*Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация***Лачуга Ю.Ф., Зинцов А.Н., Ковалев М.М., Перов Г.А.**

Научные аспекты повышения эффективности процессов очеса семенных коробочек при двухфазной уборке льна-долгунца

53

Завражных А.А., Завражных А.И., Земляной А.А., Ланцев В.Ю., Акишин Д.В., Ибраев А.С., Якушев А.В.

Геометрия посева пропашных культур

59

Каличкин В.К., Альсова О.К., Максимович К.Ю., Васильева Н.В.

Прогнозирование засоренности посевов с использованием методов машинного обучения

67

Farming and Amelioration**Tyutyunov S.I., Tsygutkin A.S., Logvinov I.V.**

Sugar beet harvest depending on crop rotation, method of basic tillage, doses of mineral and organic fertilizers

3

Plant Growing, Plant Protection and Biotechnology**I. A. Engalycheva, E. G. Kozar, E. P. Pronina, V. A. Ushakov**

The immunological evaluation of a new promising variety of vegetable beans (*Vicia faba* L.) Russkaya belaya for resistance to the most harmful phytopathogens

8

V. M. Kosolapov, V. I. Cherniavskih, M. N. Marinich

Seed productivity of variety samples of fescue reed lawn direction

13

Ilyushko M.V., Guchenko S.S., Lelyavskaya V.N., Bezmutko S.V., Romashova M.V.

Resistance of far eastern rice *Oryza sativa* L. Varieties and competitive testing samples to *Pyricularia oryzae* cav.

19

Kincharov A.I., Demina E.A.

Analysis and short-term forecast of changes in climatic conditions in the adaptive breeding of spring cereals

23

Goncharenko A. A., Chernykh V. Ya., Makarov A. V., Bykova N. Y., Karpushina E. V., Yashina N.A.

Multiple parameter assessment of quality of grain of populations of winter ry e with various viscosity of water extract

31

Kolesnikov L.E., Kolesnikov E.K., Pavlyushin V.A., Chernov S.V., Kolesnikova Yu.R.

Phenotypic expression of wheat resistance to brown rust: elements and modeling

38

Agricultural Soil Science and Agroecology**Panov A.V., Kuznetsov V.K., Tsygvintsev P.N., Isamov N.N.**

Radiation safety of agrosphere in the vicinity of nuclear power plants

47

Mechanization, Electrification, Automation and Digitalization**Lachuga Yu. F., Zintsov A.N., Kovalev M. M., Perov G. A.**

Scientific aspects of improving the efficiency of seedpod combing processes in two-phase harvesting of flax

53

Zavrzhnov A.A., Zavrzhnov A.I., Zemlyanoj A.A., Lantsev V.Yu., Akishin D.V., Ibraev A.S., Yakushev A.V.

Geometry of sowing around crops

59

Kalichkin V.K., Alsova O.K., Maksimovich K.Yu., Vasilyeva N. V.

Application of machine learning to forecast the contamination of crops

67

Земледелие и мелиорация

УДК 638.63: 631.8

DOI: 10.31857/S250026272201001X

УРОЖАЙ САХАРНОЙ СВЁКЛЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СЕВООБОРОТА, СПОСОБА ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ, ДОЗ МИНЕРАЛЬНЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ

С.И. Тютюнов, член-корреспондент РАН,
А.С. Цыгуткин, кандидат биологических наук,
И.В. Логвинов

Белгородский федеральный аграрный научный центр РАН,
308001, Белгород, ул. Октябрьская, 58
E-mail: ASZ.RU@mail.ru

Исследование проводили с целью изучения закономерностей влияния севооборотов, способов основной обработки почвы, доз минеральных и органических удобрений на урожайность сахарной свёклы по результатам многофакторного полевого опыта, заложенного в 1987 г. в Белгородской области на чернозёме типичном тяжелосуглинистом с содержанием в слое 0...30 см гумуса – 5,18...5,32 %, подвижного фосфора и калия (по Мачигину) – 52...58 и 95...105 мг/кг соответственно, рН_{сол.} – 5,8...6,4. Опыт заложен по полной факториальной схеме 3×3×3×3, которая включает 81 вариант. Число повторений в опыте – три. Размер делянки 4 м × 30 м. Для описания действия и взаимодействия факторов применяли регрессионный метод. Использование квадратичной модели показало тесную связь между фактическими и расчётными значениями при R = 0,94...1,00. Преимущество имел зернопаропропашной севооборот с многолетними травами, в котором сбор корнеплодов сахарной свёклы в среднем по обработкам без удобрений составил 19,0 т/га, в зернопропашном севообороте – 17,0 т/га, в зернопаропропашном севообороте с чистым паром – 15,7 т/га. Среди обработок преимущество имела безотвальная. В зернопаропропашном севообороте внесение N₁₈₀P₁₈₀K₁₈₀ увеличивало урожай на 68,8...103,3 %. Использование 80 т/га навоза обеспечивало рост урожайности на 53,7...84,7 %. В пропашных севооборотах прибавки урожая от органических и минеральных удобрений были выше. В вариантах с двойными дозами минеральных удобрений в зависимости от обработки почвы урожай возрастал на 89,5...130,0 %, с дозами навоза 40 т/га – на 17,1...42,7 %, 80 т/га – на 86,8...109,3 %. Максимальная в опыте урожайность (48,9 т/га) отмечена в севообороте с чёрным паром и двойными дозами удобрений на фоне вспашки. Эффективность минеральных и органических удобрений была выше при использовании глубоких способов обработки почвы. Наибольший урожай сахарной свёклы отмечен в вариантах с совместным применением органических и минеральных удобрений.

SUGAR BEET HARVEST DEPENDING ON CROP ROTATION, METHOD OF BASIC TILLAGE, DOSES OF MINERAL AND ORGANIC FERTILIZERS

Tyutyunov S.I., Tsygutkin A.S., Logvinov I.V.

Belgorod Federal Agrarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 308001, Belgorod, ul. Oktyabrskaya, 58
E-mail: ASZ.RU@mail.ru

In a long-term field multifactorial experiment, laid down in 1987 in the Belgorod region on typical medium-sized low-humus heavy loam on loess-like loam with a layer of 0-30 cm containing 5.18...5.32% humus, 52...58 mg/kg of mobile phosphorus and 95...105 mg/kg of mobile potassium soil (according to Machigin), pH_{sol.} – 5.8...6.4. In the experiment, the regularities of the influence of crop rotations, methods of basic tillage, doses of mineral and organic fertilizers for the sugar beet harvest. To describe the action of the studied factors and their interactions, a regression method was used to process the data of factors with quantitative gradations. To assess the influence of the studied factors on the sugar beet harvest, a quadratic model was used, the use of which showed a close relationship between the actual values and the calculated ones with a correlation coefficient ranging from 0.945 to 1,000. The experience is based on the full 3×3×3×3 factorial scheme, which includes 81 variants. The number of repetitions in the experiment is three. The size of the plot is 4 m × 30 m. When laying out the experiment, the method of split plots with a systematic arrangement of variants within repetitions was used. Among the crop rotations studied, the grain-grass crop rotation with perennial grasses had a noticeable advantage, in which the sugar beet yield averaged 19.0 t/ha for processing without the use of fertilizers, 17.0 t/ha in the grain crop rotation, and 15.7 t/ha in the grain crop rotation with pure steam. Among the methods of basic tillage, non-tillage had an advantage. Crop rotation yield averaged 18.1 t/ha. In the grain-grass crop rotation, the introduction of azofoska at a dose of N180P180K180 increased the yield by 68.8 ... 103.3%. The greatest yield was obtained in the variant with dump plowing. The use of manure at a dose of 80 t/ha provided an increase in yield by 53.7...84.7%. In tilled crop rotations, the yield increases during the application of organic and mineral fertilizers were noticeably higher. In variants with double doses of mineral fertilizers, depending on the tillage, the yield was increased by 89.5 ...130.0%. The increase from the action of 40 t/ha of manure was 17.1... 42.7%, 80 t/ha – 86.8...109.3%. The maximum yield of sugar beet in the experiment was 48.9 t/ha, which was achieved in the crop rotation with black steam in the variant with double doses of fertilizers on the background of plowing. The efficiency of mineral and organic fertilizers was higher with deep tillage methods. The greatest yield of sugar beet was obtained in variants where organic and mineral fertilizers were used together.

Ключевые слова: сахарная свёкла (*Beta vulgaris*), длительный многофакторный полевой опыт, севооборот, основная обработка почвы, минеральные удобрения, органические удобрения.

Key words: sugar beet (*Beta vulgaris*), long-term multifactorial field experience, crop rotation, basic tillage, mineral fertilizers, organic fertilizers.

Увеличение производства сахара остается одной из наиболее актуальных проблем агропромышленного комплекса России. В Белгородской области одной из ведущих сельскохозяйственных культур выступает сахарная свёкла, доля которой в структуре посевных площадей в регионе составляет около 10 %. Эта культура требовательна к почвенным условиям и уровню минерального питания. Увеличение производства сахарной свёклы и повышение доходности отрасли возможно при росте её урожая. Интенсивные наукоёмкие экологически безопасные технологии возделывания сельскохозяйственных культур предусматривают качественное и своевременное выполнение комплекса связанных между собой мероприятий, в том числе выбор лучших предшественников, качественная обработка почвы, использование семян высших репродукций, применение минеральных и органических удобрений, пестицидов [1, 2, 3].

Эффективность технологий возделывания сахарной свёклы зависит от многих факторов [4, 5]. Поэтому для разработки оптимальной экологически безопасной технологии необходима детальная научная информация об эффективности составляющих её элементов. Эти вопросы проработаны недостаточно.

Цель исследований – изучить закономерности влияния севооборотов, способов основной обработки почвы, доз минеральных и органических удобрений на урожайность сахарной свёклы и описать их действие с использованием математических моделей.

Методика. Длительный многофакторный полевой опыт по полной факториальной схеме заложен в Белгородском ФАНЦ РАН в 1987 г. Для достижения поставленной цели использовали результаты учета урожая сахарной свёклы в пятой ротации севооборота, которые обрабатывали методом регрессионного анализа.

Почва опытного участка – чернозём типичный среднесуглинистый малогумусный тяжелосуглинистый на лёссовидном суглинке с содержанием в слое 0...30 см 5,18...5,32 % гумуса, 52...58 мг/кг подвижного фосфора и 95...105 мг/кг подвижного калия (по Мачигину), рН_{ср.} – 5,8...6,4 [6].

Все известные полевые опыты по этой теме проводили по схемам с небольшим числом вариантов. Они не обеспечивают накопления необходимой информации для оптимизации технологий возделывания сельскохозяйственных культур, в том числе сахарной свёклы [7]. В условиях Белгородской области впервые на основе использования математических методов планирования эксперимента на чернозёме типичном проведено изучение поставленных вопросов в полевом опыте по полной факториальной схеме, благодаря которой получены экспериментальные данные, обеспечившие возможность моделирования действия минеральных и органических удобрений при разных способах основной обработки почвы в севооборотах с различным уровнем насыщения пропашными культурами.

Полная факториальная схема 3×3×3 включает 81 вариант. Число повторений в опыте – три. Размер делянки 4 м × 30 м. При закладке опыта использовали метод расщеплённых делянок с систематическим расположением вариантов внутри повторений.

Схема опыта предусматривала изучение следующих вариантов:

севооборот (фактор А) – зернотравянопропашной с долей пропашных культур 20 % (озимая пшеница – сахарная свёкла – ячмень + многолетние травы (эспар-

цет) – многолетние травы 1 г.п. – многолетние травы 2 г.п.); зернопропашной с долей пропашных культур 40 % (озимая пшеница – сахарная свёкла – ячмень – кукуруза на силос – горох); зернопаропропашной с долей пропашных культур 60 % (озимая пшеница – сахарная свёкла – кукуруза на силос – кукуруза на зерно – чёрный пар);

способ основной обработки почвы (фактор В) – отвальная (вспашка на глубину 30...32 см), безотвальная (обработка орудием типа Параплау на 30...32 см), минимальная (обработка дискатором на 12...14 см);

органические удобрения (фактор С) – 0, 40, 80 т/га полупрепавшего подстилочного навоза крупного рогатого скота один раз за ротацию под сахарную свеклу;

минеральные удобрения (фактор D) – 0, N₉₀P₉₀K₉₀, N₁₈₀P₁₈₀K₁₈₀ в виде аммофоски с содержанием N₁₆P₁₆K₁₆.

Технология возделывания сахарной свёклы общепринятая для Центрально-Чернозёмного региона. Сорт сахарной свёклы Льговская односемянная 52 высевали по озимой пшенице.

Статистический анализ экспериментальных данных проводили регрессионным методом. Для установления количественных зависимостей урожая от доз органических и минеральных удобрений использовали модель с целыми и квадратичными степенями для органических (Oy) и минеральных (My) удобрений и целыми степенями для их парных взаимодействий:

$Y = a_0 + a_1Oy + a_2Oy^2 + a_3My + a_4My^2 + a_5(OyMy)$,
где Y – урожай сахарной свёклы, т/га; a₀ – свободный член, отражающий величину этого показателя без удобрений; a₁, a₂, a₃ и т.д. – коэффициенты, отражающие действие того или иного фактора и взаимодействий факторов.

В уравнении регрессии использовали только главные эффекты факторов и их парные взаимодействия, так как на них приходится около 95 % эффектов от прибавок урожаев [8].

Расчёт уравнений осуществляли с использованием экспериментальных данных по программе, предусматривающей последовательную оценку и исключение незначимых членов регрессии, на основе критерия t-Стьюдента при уровне вероятности 0,95 [9]. Согласованность теоретических и фактических данных оценивали с использованием коэффициента множественных корреляций (R).

Метеорологические наблюдения проводили на специально оборудованном метеопосту, расположенном на экспериментальном участке (табл. 1). В агроклиматической зоне проведения исследований

Табл. 1. Метеорологические условия за годы проведения исследований

Год	Сумма среднесуточных температур воздуха выше +10 °С за вегетационный период (апрель–сентябрь), °С	Сумма осадков за период с температурой воздуха выше +10 °С, мм	ГТК
2008	2621,1	140,5	0,54
2009	3067,5	137,4	0,45
2010	3605,6	202,7	0,56
2011	3152,3	282,2	0,89
2012	3547,1	296,6	0,84
Среднее	3198,7	211,9	0,66

Табл. 2. Уравнения регрессии, отражающие зависимость урожаев сахарной свёклы от доз органических и минеральных удобрений в севооборотах при разных способах основной обработки почвы

Год	Обработка почвы	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
Зерноотравнопропашной севооборот			
2008	вспашка	$Y = 212,03 + 93,81Oy + 130,34My$	0,975
	безотвальная	$Y = 306,51 + 47,40Oy^2 + 43,66My^2$	0,991
	минимальная	$Y = 227,92 + 80,14Oy + 102,61My$	0,970
2009	вспашка	$Y = 256,92 + 53,84Oy^2 + 86,36My - 25,23OyMy$	0,981
	безотвальная	$Y = 237,52 + 54,67Oy + 102,35My$	0,959
	минимальная	$Y = 248,85 + 36,34Oy^2 + 92,31My$	0,956
2010	вспашка	$Y = 66,44 + 34,83Oy + 45,18My$	0,965
	безотвальная	$Y = 88,24 + 22,83Oy + 25,33My$	0,988
	минимальная	$Y = 96,46 + 20,33Oy + 25,72My$	0,960
2012	вспашка	$Y = 171,47 + 31,38Oy^2 + 103,22My$	0,972
	безотвальная	$Y = 187,71 + 23,87Oy^2 + 67,06My + 14,83OyMy$	0,994
	минимальная	$Y = 178,67 + 70,67Oy + 69,00My$	0,993
Зернопропашной севооборот			
2008	вспашка	$Y = 220,28 + 77,78Oy + 104,88My$	0,987
	безотвальная	$Y = 240,41 + 81,98Oy + 84,06My$	0,975
	минимальная	$Y = 226,61 + 55,45Oy + 89,42My$	0,961
2009	вспашка	$Y = 164,78 + 144,11Oy + 162,50My - 49,50OyMy$	0,986
	безотвальная	$Y = 158,32 + 132,42Oy + 127,97My - 46,42OyMy$	0,976
	минимальная	$Y = 209,24 + 83,33Oy + 78,39My$	0,978
2010	вспашка	$Y = 75,29 + 9,74Oy^2 + 36,44My$	0,994
	безотвальная	$Y = 67,72 + 8,00Oy^2 + 37,28My$	0,983
	минимальная	$Y = 81,35 + 4,81Oy^2 + 17,78My$	0,920
2012	вспашка	$Y = 200,89 + 28,89Oy + 21,28Oy^2 + 35,44My + 15,17OyMy$	0,999
	безотвальная	$Y = 195,50 + 56,72Oy + 61,56My$	0,948
	минимальная	$Y = 203,78 + 51,83Oy + 44,50My$	0,959
Зернопарпропашной севооборот			
2008	вспашка	$Y = 195,46 + 43,70Oy + 10,25Oy^2 + 105,92My - 15,74My^2 + 38,75OyMy$	1,000
	безотвальная	$Y = 184,75 + 47,68Oy + 7,36Oy^2 + 91,74My - 5,30My^2 + 29,70OyMy$	1,000
	минимальная	$Y = 197,78 + 207,92Oy - 56,59Oy^2 + 108,60My$	0,994
2009	вспашка	$Y = 163,46 + 97,82Oy + 145,75My$	0,945
	безотвальная	$Y = 248,32 + 29,94Oy^2 + 135,23My$	0,959
	минимальная	$Y = 193,40 + 48,54Oy^2 + 94,31My$	0,977
2010	вспашка	$Y = 54,47 + 39,14Oy - 7,05Oy^2 + 54,22My - 9,29My^2 - 3,31OyMy$	0,999
	безотвальная	$Y = 76,23 + 7,91Oy^2 + 36,76My$	0,970
	минимальная	$Y = 98,83 + 5,99Oy^2 + 23,36My$	0,991
2012	вспашка	$Y = 119,87 + 104,58Oy + 93,48My$	0,960
	безотвальная	$Y = 183,07 + 25,61Oy^2 + 106,69My - 25,02My^2 + 14,12OyMy$	0,996
	минимальная	$Y = 166,06 + 62,99Oy + 65,86My$	0,966

суммы температур выше +10 °С достаточно для формирования урожая сахарной свёклы.

В среднем за пятую ротацию севооборота (2008–2012 гг.) ГТК варьировал от 0,45 в 2009 г. до 0,89 в 2011 г. и был равен в среднем 0,66, что значительно ниже среднегодовое значение (1,10) и характеризует условия вегетации как засушливые. Наиболее острый недостаток влаги отмечен в 2008, 2009 и 2010 гг.

Потребность сахарной свёклы в воде за вегетационный период составляет 365...470 мм. В наших исследованиях сумма осадков за период с температурой выше +10 °С в среднем за 2008–2012 гг. находилась на уровне 211,9 мм, то есть в 2 раза меньше оптимальной величины этого показателя. Потребность сахарной свёклы в воде в период вегетации не одинакова. С июня до августа, во время наибольшего прироста массы, она самая высокая. В годы исследований в период интенсивного роста растений и, как следствие, потребления максимального количества влаги (май–июль) выпадало достаточное количество осадков, что благоприятно отразилось на урожайности культуры.

В 2010 г. в июле среднемесячная температура составила 26,5 °С при многолетней норме 19,9 °С. Максимальная температура воздуха в этом месяце составляла 38 °С, а на поверхности почвы она достигала 59 °С, что негативно отразилось на урожайности сахарной свёклы. Поэтому в целом период исследований выдался неблагоприятным для сахарной свёклы, урожайность которой ограничивало недостаточное количество осадков.

Результаты и обсуждение. Ранее проведённые исследования показали, что для описания действия и взаимодействий изучаемых факторов на урожай сельскохозяйственных культур, их рост и развитие, содержания питательных элементов в растениях более подходит половинная модель, на изменение показателей, характеризующих уровень плодородия почв, – квадратичная модель. Такой вывод был сделан по результатам исследований, в которых схемы опыта включали 4 градации изучаемых факторов и более.

В нашем случае схема полевого опыта предусматривает ограниченное число градаций факторов (три),

Табл. 3. Урожайность сахарной свёклы в зависимости от видов севооборотов и способов обработки почвы за пятую ротацию, т/га

Вид севооборота	Год				Среднее за ротацию
	2008	2009	2010	2012	
Вспашка					
Зерноотравнопропашной	21,2	25,7	6,6	17,2	17,7
Зернопропашной	22,0	16,5	7,5	20,1	16,5
Зернопарпропашной	19,6	16,4	5,5	12,0	13,3
Безотвальная обработка					
Зерноотравнопропашной	30,7	23,8	8,8	18,8	20,5
Зернопропашной	24,0	15,8	6,8	19,6	16,6
Зернопарпропашной	18,5	24,8	7,6	18,3	17,3
Минимальная обработка					
Зерноотравнопропашной	22,8	24,9	9,7	17,9	18,8
Зернопропашной	22,7	20,9	8,1	20,4	18,0
Зернопарпропашной	19,8	19,3	9,9	16,6	16,4

Табл. 4. Влияние органических и минеральных удобрений на урожай сахарной свёклы, т/га

Вариант	Вспашка		Безотвальная		Минимальная	
	урожай	прибавка	урожай	прибавка	урожай	прибавка
Зернотравянопропашной						
00	17,7	–	20,5	–	18,8	–
01	26,8	9,1	26,5	6,0	26,0	7,2
02	35,9	18,2	34,6	14,1	33,3	14,5
10	23,0	5,3	24,2	3,7	24,0	5,2
11	31,5	13,8	33,1	12,6	31,2	12,4
12	40,0	22,3	39,1	18,6	38,5	19,7
20	32,6	14,9	31,5	11,0	31,0	12,2
21	40,5	22,8	38,2	17,7	35,7	16,9
22	48,4	30,7	47,1	26,6	45,5	26,7
Зернопропашной севооборот						
00	16,5	–	16,6	–	18,0	–
01	25,2	8,6	26,8	10,2	23,8	5,8
02	33,5	17,0	32,1	15,5	29,5	11,5
10	23,6	7,1	23,5	6,9	22,9	4,9
11	31,2	14,7	30,1	13,5	28,7	10,6
12	38,8	22,3	36,8	20,2	34,4	16,4
20	32,2	15,6	30,9	14,3	28,0	10,0
21	38,9	22,4	36,4	19,8	33,8	15,8
22	45,7	29,2	41,8	25,2	39,5	21,5
Зернопаропашной севооборот						
00	13,3	–	17,3	–	16,4	–
01	22,7	9,4	25,8	8,5	23,9	7,5
02	30,8	17,5	32,8	15,5	31,0	14,6
10	20,5	7,2	20,3	3,0	23,1	6,7
11	30,8	17,5	29,9	12,6	30,4	14,0
12	39,8	26,5	38,0	20,7	37,7	21,3
20	27,9	14,6	26,8	9,5	29,7	13,3
21	39,1	25,8	37,5	20,2	37,1	20,7
22	48,9	35,6	46,7	29,4	44,4	28,0

включая контроль, и имеет большую «ширину шага» между дозами удобрений. Такие данные впервые обработаны регрессионным методом с использованием квадратичной модели, которая показала высокую степень корреляции между фактическими и расчётными величинами урожая сахарной свёклы от 0,945 до 1,000 (табл. 2). При этом во всех уравнениях регрессии отмечено действие таких факторов, как органические и минеральные удобрения. В 9 уравнениях регрессии доказано влияние на урожай сахарной свёклы их парных взаимодействий.

Урожайность сахарной свёклы, рассчитанная по уравнениям регрессии, за годы пятой ротации изменялась в широком диапазоне (табл. 3). Наименьшей она была в 2010 г., когда сбор корнеплодов в вариантах без удобрений не превышал 5,5...9,9 т/га, что связано с аномально высокими температурами летом в пери-

од вегетации. Наибольшую урожайность отмечали в 2008 г. – 18,5...30,7 т/га.

Среди изучаемых севооборотов заметное преимущество имел зернотравянопропашной с многолетними травами, в котором урожайность сахарной свёклы в среднем по обработкам составляла 19,0 т/га. В зернопропашном севообороте она была равна 17,0 т/га, в зернопаропашном с чистым паром – 15,7 т/га.

Среди способов основной обработки почвы существенное преимущество имела безотвальная, при использовании которой урожайность в среднем по севооборотам составляла 18,1 т/га. В среднем за пятую ротацию максимальная урожайность сахарной свёклы на неудобренном фоне зафиксирована в зернотравянопропашном севообороте по безотвальной обработке почвы. Она составила 20,5 т/га.

Использование минеральных и органических удобрений способствовало существенному росту урожайности сахарной свёклы во всех севооборотах (табл. 4). В зернотравянопропашном с многолетними травами внесение азофоски в дозе $N_{90}P_{90}K_{90}$ увеличило ее на 29,1...51,7 % относительно контроля, а при использовании дозы $N_{180}P_{180}K_{180}$ прибавки возрастали на 68,8...103,3 %, при этом наибольший урожай был собран в варианте с отвальной вспашкой. Использование навоза в одинарной дозе обеспечивало рост урожайности на 18,1...30,3 %, в двойной – на 53,7...84,7 %. Наибольший урожай сахарной свёклы отмечен в вариантах с совместным применением органических и минеральных удобрений. Прибавки, по сравнению с вариантами без их использования, составили 129...173 %.

В пропашных севооборотах рост урожайности при внесении органических и минеральных удобрений был заметен выше. В вариантах с единичными дозами минеральных удобрений в зависимости от обработки почвы он составлял 45,7...70,2 %, с двойными – 89,5...130,0 %, по отношению к варианту без удобрений.

Прибавки от одинарных доз навоза были равны 17,1...42,7 %, от двойных – 86,8...109,3 %. Максимальная в опыте урожайность сахарной свёклы (48,9 т/га) была достигнута в севообороте с чёрным паром при использовании двойных доз минеральных и органических удобрений по вспашке. Эффективность как минеральных, так и органических удобрений была выше на фоне вспашки и безотвальной обработки, а эффективность внесения минеральных удобрений в дозе $N_{180}P_{180}K_{180}$ была значительно выше, чем в дозе $N_{90}P_{90}K_{90}$.

Таким образом, среди изучаемых севооборотов за исследуемый период наиболее эффективно проявил себя зернотравянопропашной, преимущество которого было наиболее заметно на неудобренных фонах, где урожайность сахарной свёклы на 18,4...23,7 % превышала величину этого показателя в зернопропашном и зернопаропашном севооборотах. Из исследуемых способов обработки почвы вспашка и безотвальная обработка имели заметное преимущество, по отношению к минимальной, которое возрастало на фонах с двойными дозами минеральных и органических удобрений.

Внесение органических удобрений наиболее эффективным было в пропашных севооборотах при заделке под отвальную вспашку, где они обеспечивали существенные прибавки урожайности сахарной свёклы. Применение минеральных удобрений увеличивало сбор корнеплодов сахарной свёклы,

относительно абсолютного контроля, на 103,3 %, а при их совместном использовании с органическими прибавка достигала 173 %. Эффективность удобрений была выше в пропашных севооборотах при глубокой заделке.

Литература.

1. Козлова З.В., Матаис Л.Н., Глушкова О.А. Влияние кормовых севооборотов на засоренность посевов и урожайность сельскохозяйственных культур в условиях Прибайкалья // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2020. Т. 15. № 2 (58). С. 20-24.
2. Соловиченко В.Д., Навольнева Е.В., Логвинов И.В. Продуктивность чернозема типичного в зависимости от факторов земледелия в юго-западной части ЦЧЗ // Земледелие. 2020. № 1. С. 27-29.
3. Кузина Е.В. Влияние обработки почвы и удобрений на урожайность и качество зерна яровой пшеницы // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 1 (61). С. 28-33.
4. Куницын Н. А., Минакова О. А. Последствие удобрений, применяемых в севообороте с сахарной свёклой, на плодородие чернозёма выщелоченного, урожайность и качество зерновых культур в Центральном Черноземье // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 6. С. 14-18.
5. Никитин В. В., Соловиченко В. Д., Карабутов А. П. Влияние вида севооборота, способов основной обработки почвы и удобрений на энергетические показатели возделывания сахарной свеклы в юго-западной части ЦЧР // Земледелие. 2019. № 1. С. 18-21.
6. Влияние способов обработки почвы, минеральных и органических удобрений в различных севооборотах на содержание гумуса в чернозёме типичном / С. И. Тютюнов, В. Д. Соловиченко, А. С. Цыгуткин и др. // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 5. С. 7-12.
7. Цыгуткин А. С. Информативность опыта и ее оценка // Химия в сельском хозяйстве. 1996. № 6. С. 45-46.
8. Цыгуткин А. С., Азаров А. В. Изучение влияния технологий возделывания сельскохозяйственных культур и почвы, как саморазвивающейся системы, на содержание гумуса // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 6. С. 44-49.
9. Цыгуткин А. С. Методология статистической обработки многолетних данных опыта. М.: Россельхозакадемия, 2002. 26 с.

Поступила в редакцию 27.11.2021
После доработки 21.12.2021
Принята к публикации 20.01.2022

Растениеводство, защита и биотехнология растений

УДК 635.651:635.152

DOI: 10.31857/S2500262722010021

ИММУНОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НОВОГО ПЕРСПЕКТИВНОГО СОРТА БОБОВ ОВОЩНЫХ (*Vicia faba* L.) РУССКИЕ БЕЛЫЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К НАИБОЛЕЕ ВРЕДНОСНЫМ ФИТОПАТОГЕНАМ

И. А. Енгальчева, кандидат сельскохозяйственных наук, Е. Г. Козарь, кандидат сельскохозяйственных наук, Е. П. Пронина, кандидат сельскохозяйственных наук, В. А. Ушаков, кандидат сельскохозяйственных наук

Федеральный научный центр овощеводства
143080, Московская обл., Одинцовский р-н, пос. ВНИИССОК, ул. Селекционная, 14
E-mail: engirina1980@mail.ru

Исследования проводили с целью оценки устойчивости перспективного сорта бобов овощных Русские белые, отвечающего требованиям современного рынка, к экономически значимым болезням. Работу выполняли в условиях Московской области в 2017–2020 гг. Агротематологические условия в период проведения исследований были благоприятными для развития вредоносных фитопатогенов, что позволило провести объективную оценку в условиях естественного инфекционного фона. Патогенный комплекс бобов овощных во все годы исследований был представлен доминирующими возбудителями шоколадной пятнистости (*Botrytis fabae*), аскохитоза (*Ascochyta fabae*), фузариозного увядания (*Fusarium solani*, *Foxysporium v.oxysporum*, *F.sambucinum*, *F.sporotrichiella*). В отдельные годы зарегистрированы эпифитотии ржавчины бобов (*Uromyces viciae-fabae*) и стемфиллиоза (*Stemphylium* spp.). В связи с изменением климата отмечено нарастание вредоносности вирусных патогенов, в частности вируса желтой мозаики фасоли – ВЖМФ (Bean yellow mosaic -BYMV) и вируса огуречной мозаики – ВОМ (Cucumber mosaic virus-CMV). Сорт Русские белые обладает высокой устойчивостью к болезням грибной и вирусной этиологии, по сравнению с другими районированными и широко выращиваемыми сортами бобов овощных. В годы эпифитотий степень поражения аскохитозом, шоколадной пятнистостью, фузариозом, вирусом желтой мозаики фасоли оставалась низкой и не превышала 14 %. Сорт бобов овощных Русские белые может быть рекомендован для выращивания в регионах с неблагоприятной эпифитотийной обстановкой.

THE IMMUNOLOGICAL EVALUATION OF A NEW PROMISING VARIETY OF VEGETABLE BEANS (*Vicia faba* L.) RUSSKAYA BELAYA FOR RESISTANCE TO THE MOST HARMFUL PHYTOPATHOGENS

Engalycheva I. A., Kozar E. G., Pronina E. P., Ushakov V. A.

Federal Scientific Center of Vegetable-Growing
143080, Moskovskaya obl., Odintsovskii r-n, pos. VNISSOK, ul. Selektionnaya, 14
E-mail: engirina1980@mail.ru

The purpose of the research was the evaluation of the promising Russkaya Belaya variety that meets the requirements of the modern market for resistance to economically significant diseases. The research was carried out in the conditions of the Moscow region in 2017–2020 on the basis of the Federal Scientific Vegetable Center (FSBSI FSVC). Agrometeorological conditions during the period of operation were optimal for the development of harmful phytopathogens, that made it possible to objectively assess a promising variety for disease resistance. It was carried out the pathogenic complex structure analysis of vegetable beans, represented in all years by the dominant pathogens of chocolate spotting (*Botrytis fabae*), ascochytois (*Ascochyta fabae*), fusarium wilt (*Fusarium solani*, *Foxysporium v.oxysporum*, *F.sambucinum*, *F.sporotrichiella*). In some years, epiphytotics of bean rust (*Uromyces viciae-fabae*) and stemphyliosis (*Stemphylium* spp.) have been recorded. Due to climate change, there has been an increase in the harmfulness of viral pathogens, in particular the Bean yellow mosaic virus – BYMV and Cucumber mosaic virus – CMV. The immunological assessment conducted against the background of a tense infectious background in various years showed that the Russkaya Belaya variety has a high resistance to diseases of fungal and viral etiology relative to other zoned and widely grown varieties of vegetable beans. During the epiphytotic years, the degree of lesion with ascochitosis, chocolate spotting, fusarium, yellow mosaic bean virus remained low and did not exceed 14%. Along with a number of valuable features, the promising Russkaya Belaya variety can be recommended for cultivation in regions with unfavorable epiphytotic conditions.

Ключевые слова: бобы овощные (*Vicia faba* L.), устойчивость, фитопатогены, эпифитотия, микозы, вирусы.

Key words: vegetable beans (*Vicia faba* L.), resistance, phytopathogens, epiphytotics, mycoses, viruses.

В последние годы большое значение приобретают исследования, направленные на решение проблемы обеспечения населения пищевым белком растительного происхождения. В этом свете экономически оправдано выращивание бобов (*Vicia faba* L.), которые превосходят другие овощи по пищевым качествам, а выращивание их наименее трудоемко. Бобы – четвертая по важности зернобобовая культура в мире после гороха, сои и фасоли [1, 2]. Сегодня на площади 2,5 млн га мировое производство этой важной продовольственной культуры достигло 5,4 млн т, в том числе более 33 % приходится на Китай, 29 % – на Европу, 27 % – на Северную Африку и около 6 % – на Австралию [3].

Несмотря на то, что бобы играют важную роль в программах продовольственной безопасности многих стран мира, в России эта культура остается узко культивируемой. Основные центры ее возделывания сосредоточены в средней полосе России и более северных регионах в мелких фермерских и личных хозяйствах [4], тогда как промышленное производство бобов в стране практически отсутствует. В Государственном реестре селекционных достижений, допущенных к использованию в 2021 г., всего 20 сортов бобов овощных, из которых 4 сорта селекции ФГБНУ ФНЦО [5].

Одним из факторов, лимитирующих выращивание бобов, выступает поражение их различными фитопато-

генами. На сегодняшний день среди патогенных микроорганизмов грибной этиологии, поражающих *Vicia faba* L., экономическое значение как в нашей стране, так и во всем мире имеют шоколадная пятнистость (*Botrytis fabae*), аскохитоз (*Ascochyta fabae*), ржавчина бобов (*Uromyces viciae-fabae*), стемфиллиоз (*Stemphylium spp.*), фузариозное увядание (*Fusarium spp.*) [6, 7]. По литературным данным, симптоматика, развитие и распространенность шоколадной пятнистости очень сильно варьируют в зависимости от региона. Поэтому и устойчивость к заболеванию зачастую бывает обусловлена взаимодействием факторов «генотип – патоген – среда», что приводит к вариации фенотипической реакции одних и тех же сортов в ответ на заражение *Botrytis fabae*: проявление устойчивости в условиях одного региона и абсолютная потеря ее в условиях другого [8, 9]. По мнению Sillero J. C., et al. [10], объяснением может быть очень узкая вирулентность местных популяций патогенов в различных регионах, соответствующая специфическим генам устойчивости в растительном материале. Согласно результатам исследований Terefe H., et al. [11], изменение температуры оказывало существенное влияние даже на биологические особенности вида гриба *Botrytis fabae*, приводя к сильному уменьшению размера конидий. Устойчивость к *Botrytis fabae* носит полигенный характер, а все современные сорта и гибриды бобов обладают неполной устойчивостью. На сегодняшний день известно несколько методик искусственного заражения растений бобов в селекционной программе на устойчивость – искусственное заражение сеянцев, метод отделенных листьев и др. [12, 13]. Но по мнению Beuene A. T., et al. [14], скрининг селекционного материала на устойчивость к шоколадной пятнистости и создание сортов на его основе должны обязательно проходить в условиях полевых испытаний того региона, где планируются производственные посевы.

С 80-х гг. прошлого столетия развитие аскохитоза носило эпифитотийный характер во многих странах. С тех пор особое внимание уделяется поиску генетических источников устойчивости к *Ascochyta fabae* Speg. (телеоморф *Didymella fabae* Jellis & Punithalingam), их использованию в селекционных программах по созданию устойчивых сортов бобов в Англии, Испании, Сирии и других странах [15, 16].

В патогенном комплексе, вызывающем фузариозное увядание на бобах овощных, чаще встречаются виды *F. solani*, *F. oxysporum v. oxysporum*, *F. sambucinum*, *F. sporotrichiella*. На всех бобовых культурах усиливается вирулентность ранее слабопатогенных видов *F. oxysporum v. artroceras*, *F. semitectum*, *F. javanicum* [17].

Наиболее вредоносными вирусными патогенами, наносящими экономический ущерб культуре бобов, выступают: вирус желтой мозаики фасоли (*Bean yellow mosaic virus*), вирус крапчатости бобов (*Broad bean mottle virus*), вирус некроза бобов (*Broad bean necrosis virus*), вирус огуречной мозаики (*Cucumber mosaic virus*) [18, 19]. Вирусы настоящей мозаики бобов (*Broad bean true mosaic virus*), вирус увядания бобов (*Broad bean wild virus*) относят к группе эндемичных, появление которых связано с определенными условиями отдельных стран и регионов [20, 21].

В условиях Московской области в последние годы отмечается все большее распространение вируса желтой мозаики фасоли (*Bean yellow mosaic potyvirus* – ВУМВ, ВЖМФ) и вируса огуречной мозаики (*Cucumber mosaic virus* – СМВ, ВОМ) [18]. Как и большинство представителей рода *Potyvirus*, ВЖМФ имеет очень широкий

диапазон растений-хозяев из различных семейств. Все штаммы вируса передаются векторно более чем двадцатью видами тлей неперсистентным способом. По горизонтали распространение также возможно механическим путем, а по вертикали – семенами. Распространение ВОМ – представителя семейства *Cucumovirus* – осуществляется неперсистентным способом большим числом тли. Семенами вирус не передается.

В складывающейся экологической и экономической обстановке для обеспечения высокого качества отечественной продукции необходимо усиление исследований по созданию высокопродуктивных сортов бобов овощных с высоким адаптивным потенциалом и устойчивостью к экономически значимым фитопатогенам [22]. Модель сорта в современном селекционном процессе предусматривает наличие таких признаков, как скороспелость, детерминантный тип роста стебля, неполегаяемость, нерастрескиваемость бобов, их одновременное созревание, высокое прикрепление нижних бобов, высокая семенная продуктивность и качество семян, предполагающее сбалансированный аминокислотный состав и высокое содержание белка (до 34...37%), отсутствие или минимальное содержание антипитательных веществ (вицина, конвигина и танина), устойчивость к наиболее вредоносным фитопатогенам [23].

Поэтому необходимо изучение и использование потенциала внутривидовой гибридизации, расширяющей возможности комбинационной изменчивости. Для решения этой задачи был изучен различный по происхождению сортовой материал бобов овощных из мировой коллекции ВИР и ФНЦО. В результате были подобраны сорта-компоненты скрещиваний, характеризующиеся важными селекционно-ценными признаками и проведена ступенчатая гибридизация. Очередностью вовлечения в скрещивания родительских сортов регулировали появление представляющих наибольшую ценность признаков. В ходе изучения поколений F_1 ... F_3 различных гибридных комбинаций по количественным и качественным признакам путем многократного индивидуального отбора был выделен новый исходный материал с комплексом хозяйственно ценных признаков и создан новый среднеспелый урожайный сорт бобов овощных Русские белые со светлыми семенами и светлым семенным рубчиком [22].

Цель исследований – оценка нового урожайного сорта бобов овощных Русские белые на устойчивость к основным болезням.

Методика. Перспективный сорт бобов овощных Русские белые создан в результате ступенчатого скрещивания с привлечением географически отдаленных и морфологически различных форм. В 2017–2019 гг. он прошел конкурсное испытание. В 2020 г. ФГБУ «Государственная комиссия Российской Федерации по испытанию и охране селекционных достижений» внесла этот сорт в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Сорт бобов овощных Русские белые относится к группе среднеспелых. Техническая стадия спелости в условиях Московского региона наступает на 52...56 сутки, биологическая – на 85...98 сутки от массовых всходов. Цветки имеют белую окраску лепестков. Высота растений, в зависимости от условий года, варьирует от 65 см до 90 см, в среднем составляя 80 см, что почти в 2 раза выше, чем у стандарта – районированного сорта Белорусские. Линейные размеры плода нового сорта, также превышают таковые у стандарта. Боб прямой длиной 11...14 см, шириной около 2 см. Поверхность боба гладкая, окраска в технической стадии спелости зеленая,



Рис. 1. Бобы овощные, сорт Русские белые.

число семян в бобе – от 3 до 5 шт. В биологической спелости семена светло коричневые, яйцевидные, имеют светлый рубчик (рис. 1).

Растения сорта Русские белые по всем элементам продуктивности превосходят сорт Белорусские. Число бобов на растении в среднем составляет около 10 шт. Масса бобов с растения выше, чем у стандарта, на 30 %, семян – на 56 %. В среднем урожайность культуры в стадии технической спелости составляет 16,8 т/га, что на 6,0 т/га больше, чем у стандарта. Масса 1000 семян изменяется от 1950 до 2060 г, в зависимости от условий выращивания.

Одно из важных требований к создаваемым сортам – устойчивость к наиболее вредоносным болезням. Ввиду этого, одновременно с отбором по основным хозяйственно-ценным признакам, проводили сопряженный отбор на устойчивость. В условиях естественного инфекционного фона оценку сорта Русские белые и отбор устойчивых генотипов проводили к доминирующим болезням грибной этиологии: аскохитозу, шоколадной пятнистости и фузариозному увяданию, развитие которых часто носит эпифитотийный характер. Существенно реже отмечаются симптомы поражения бобов овощных ржавчиной и черной пятнистостью, хотя в отдельные годы развитие ржавчины также достигало размеров эпифитотии.

Фитосанитарный мониторинг развития грибной и вирусной инфекции на посевах сорта бобов Русские белые в Московской области осуществляли в 2017–2020 гг. на базе ФГБНУ Федеральный научный центр овощеводства (ФГБНУ ФНЦО). Работу по идентификации выделенных изолятов вирусов и микомицетов проводили на базе лаборатории иммунитета и защиты растений ФНЦО. В качестве стандарта использовали районированный сорт Белорусские как наиболее распространенный, а также наиболее схожий с испытываемым сортом по основным морфометрическим параметрам (крупнотемьянность, окраска семян).

Растения бобов овощных (*Vicia faba* L.) сорт Русские белые выращивали в поле в условиях естественного инфекционного фона в питомнике конкурсного сортоиспытания лаборатории селекции и семеноводства бобовых культур в четырехкратной повторности [24].

Оценку поражения различными фитопатогенами проводили методом визуальной диагностики характерных симптомов на листьях растений по следующей шкале: 0 – отсутствие симптомов; 0,5 – слабое проявление симптомов на единичных листьях; 1 – поражено менее 10 %; 2 – поражено 10...30 %; 3 – поражено 30...50 %; 4 – поражено более 50 % всей листовой поверхности растения. Устойчивость каждого образца оценивали по общепринятым показателям: распространенность (P, %), индекс поражения (I, балл), степень развития болезни (R, %) [25]. Учеты проводили 3 раза за вегетацию в фазы третьей пары настоящих листьев, цветения и техниче-

ской спелости бобов. По совокупности всех оценок сорт относили к той или иной группе устойчивости.

Анализ видового состава микромицетов выполняли на основании микроскопирования пораженных растений [26, 27], изучения морфолого-культуральных признаков, выделенных в чистую культуру изолятов грибов и идентификации патогенов по соответствующим определителям [28, 29].

Наличие антигенов вируса желтой мозаики фасоли в листьях растений бобов овощных определяли с использованием методов электронной микрографии в Центре коллективного пользования «Дальневосточный центр электронной микроскопии» ННЦМБ ДВО РАН методом иммуноферментного анализа (ИФА) по сэндвич-варианту с использованием реагентов фирмы Agdia. Оценку результатов ИФА выполняли с использованием спектрофотометра при длине волны 480 нм по коэффициентам экстинкции. Для идентификации вируса огуречной мозаики применяли иммунологический экспресс-метод диагностики заболеваний с использованием иммунострипов фирмы Agdia.

Закладку полевых опытов, фенологические наблюдения, учет урожая, описание морфологических признаков проводили согласно [30]. Математическую и статистическую обработку данных проводили по общепринятым методикам [24] с использованием пакета прикладных программ MS EXCEL.

Результаты и обсуждение. Ввиду изменения климата, в последнее десятилетие отмечено возрастание вредоносности вирусозов, которые в средней полосе еще в прошлом столетии на культуре бобов овощных относили к малораспространенным болезням. Тем не менее, общая структура патоконтекста естественного инфекционного фона в Московской области в целом остается постоянной и ежегодно среди возбудителей меняется только «лидер», что можно увидеть на примере трех лет конкурсного испытания сорта Русские белые (рис. 2).

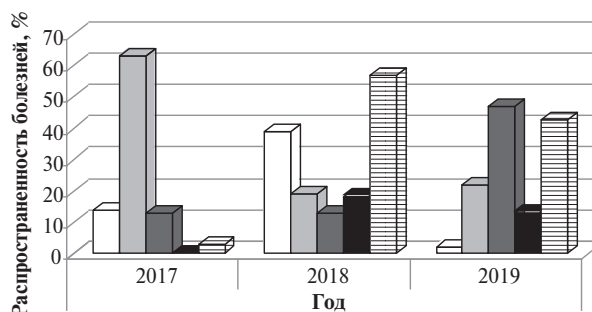


Рис. 2. Распространенность основных болезней на культуре бобов овощных в разные годы исследований: □ – аскохитоз; □ – шоколадная пятнистость; ■ – фузариоз; ■ – альтернариоз; ▨ – вирусозы.

Табл. 1. Пораженность микозами сортов бобов овощных в фазе технической спелости бобов

Сорт	Показатель развития болезни (в год наибольшей распространенности)											
	шоколадная пятнистость (2017)			аскохитоз (2018)			фузариоз (2019)			черная пятнистость (2018)		
	P, %*	I, балл	R, %	P, %	I, балл	R, %	P, %	I, балл	R, %	P, %	I, балл	R, %
Белорусские (стандарт)	65	2,3	37,4	26	1,5	11,4	5	1,5	1,8	35	2,9	25,5
Русские черные	92	3,2	73,6	70	2,5	43,8	20	2,5	12,5	30	3,0	22,5
Русские белые	41	1,3	14,1	12	0,9	3,4	12	0,5	1,5	4	2,0	2,0
НСР ₀₅	18	0,9	14,1	13	0,3	8,9	8	0,5	4,7	17	0,5	13,2

*P – распространенность; I – индекс поражения; R – степень развития болезни.

Так, в 2017 г. отмечали эпифитотию шоколадной пятнистости, в 2018 г. наибольшее распространение получили аскохитоз и вирусные болезни, в 2019 г., наряду с вирусными, наблюдали значительное развитие фузариоза, который проявлялся в виде трахеомикозного увядания, вплоть до полной гибели растений, а также в виде поражения листового аппарата краевыми некрозами и хлорозами до полного усыхания и опадения листовых пластинок.

Обследование бобов овощных в питомнике КСИ выявило существенно более высокую устойчивость нового сорта Русские белые к болезням, по сравнению с районированными наиболее широко известными отечественными сортами Белорусские и Русские черные. Степень развития шоколадной пятнистости в год эпифитотии (2017) у сорта Русские белые была ниже, чем у районированных сортов в 3...5 раз, аскохитозом и черной пятнистостью в 2018 г. – в 3...12 и 11...13 раз соответственно (табл. 1). В отношении фузариоза новый сорт проявил устойчивость на уровне сорта Белорусские благодаря более низкому среднему индексу поражения (0,5 балла) растений, при более высоком распространении. Следует отметить, что в течение всего периода исследований новый перспективный сорт существенно превосходил сорт Русские черные, у которого в последние годы отмечали высокую степень поражения растений болезнями различной этиологии в условиях Московской области. В 2018 г. на растениях нового перспективного сорта к концу вегетации отмечены симптомы поражения ржавчиной, которые отсутствовали на сортах Белорусские и Русские черные.

Метеоусловия и массовый лет насекомых-переносчиков существенно повлияли на развитие вирусных

болезней, что дало возможность оценить устойчивость сорта к двум самым опасным для культуры возбудителям вирусозов (табл. 2). В 2018 г. наибольшую опасность представлял вирус огуречной мозаики, распространенность которого на сорте Русские черные превышала 90 % с индексом поражения 3...4 балла, сорт плохо завязывал бобы и семена. Перспективный сорт Русские белые проявил толерантность к этому возбудителю. В его сортопопуляции только у половины растений отмечали признаки поражения листьев ВОМ на уровне 1...2 баллов, в отличие от сорта Белорусские с широким диапазоном варьирования индекса поражения растений (1...4 балла). В результате степень развития ВОМ у нового сорта был в 2 раза ниже, чем у стандарта.

Условия 2019 г. способствовали более широкому распространению на посевах бобов овощных вируса желтой мозаики фасоли, к которому более восприимчивым оказался сорт Белорусские, на котором отмечали самую высокую долю пораженных растений и наибольший средний балл поражения. Перспективный сорт Русские белые проявил высокую устойчивость к этому возбудителю – симптомы поражения были отмечены только у 3 % растений, что более чем в 10 раз ниже, по сравнению с двумя другими сортами.

Следует также отметить, что при достаточно высокой напряженности естественного инфекционного фона в изученных сортопопуляциях (за исключением сорта Русские черные) присутствовали внешне «здоровые» бессимптомные растения. По сравнению со стандартом, их доля в посевах нового сорта была более чем в 10 раз выше, и составляла в среднем от 8 до 15 % в зависимости от года. Это свидетельствует о том, что сорт Русские белые представляет интерес для дальнейшей селекционной работы на устойчивость как источник генов высокой групповой устойчивости к основным вредоносным болезням овощных бобов в условиях Нечерноземной зоны РФ.

Таким образом, новый сорт бобов овощных Русские белые превосходит старые сорта по групповой устойчивости к болезням. Его распространение в производстве позволит расширить ассортимент овощных бобовых культур, выращиваемых в нашей стране.

Литература.

1. *Analysis of agromorphological diversity of southern Tunisia faba bean (Vicia faba L.) germplasm / Y. Yahia, A. Guetat, W. Elfalleh, et al. // African Journal of Biotechnology. 2012. Vol. 11. No. 56. P. 11913–11924.*
2. *Impact of processing on in vitro bioavailability of phenols and flavonoids and antioxidant activities in faba bean (Vicia faba L.) and azuki bean (Vigna angularis*

Табл. 2. Пораженность вирусными сортами бобов овощных в фазе технической спелости бобов

Сорт	Показатель развития болезни (в год наибольшей распространенности)					
	ВОМ (2018)			ВЖМФ (2019)		
	P, %*	I, балл	R, %	P, %	I, балл	R, %
Белорусские - стандарт	62	2,7	42,9	44	2,2	22,2
Русские черные	91	3,5	78,8	32	1,5	12,0
Русские белые	50	1,6	20,0	3	2,0	1,5
НСР ₀₅	22	0,8	24,6	15	0,5	10,4

*P – распространенность; I – индекс поражения; R – степень развития болезни.

- L.) / Y. Luo, J. Li, C. Xu, et al. // *Legume Research*. 2014. Vol. 37. No. 5. P. 492–499. doi:10.5958/0976-0571.2014.00665.1.
3. FaoStat. Fao stat year book. 2020. URL: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (дата обращения: 16.09.2021).
 4. Мамедова С. М., Вишнякова М. А. Генетическое разнообразие коллекции бобов (*Vicia faba*) ВИР и его использование в селекции // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2020. Т. 181. № 3. С. 181–189. doi: 10.30901/2227-8834-2020-3-181-189.
 5. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. 720 с.
 6. Adaptation of spring faba bean types across European climates / F. Flores, M. Hybl, J. C. Knudsen, et al. // *Field Crops Research*. 2013. No. 145. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.01.022> (дата обращения: 16.09.2021).
 7. Walde F. W. Resistance Potential for Disease Control in Ethiopia: A Review // *Journal plant pathology and microbiology*. 2020. Vol. 11. No. 11. P. 1–5/ URL: <https://www.longdom.org/open-access/epidemiology-of-chocolate-spot-embotrytis-fabaeem-sard-and-faba-bean-emvicia-fabaeem-l-resistance-potential-for-disease-control-in--59223.html#ai> (дата обращения: 16.09.2021). doi: 10.35248/2157-7471.20.11.524.
 8. Yield stability and relationships among stability parameters in faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes / T. Temesgen, G. Keneni, T. Sefera, et al. // *The Crop Journal*. 2015. Vol. 3 No. 3. P. 258–268.
 9. Yitayih G., Azmeraw Y. Evaluation of faba bean varieties against chocolate spot (*Botrytis fabae* Sard) disease at Farta south gondar Ethiopia // *Journal of Crop Science and Biotechnology*. 2018. Vol. 21. No. 1. P. 35–41.
 10. Faba bean breeding for disease resistance / J. C. Sillero, A. M. Villegas-Fernández, J. Thomas, et al. // *Field Crops Research*. 2010. Vol. 115. No. 3. P. 297–307.
 11. Effect of temperature on growth and sporulation of *Botrytis fabae*, and resistance reactions of faba bean against the pathogen // H. Terefe, C. Fininsa, S. Sahile, et al. // *J Plant Pathol Microbiol*. 2015. Vol. 6. No. 7. URL: <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/16812/57221.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 16.09.2021).
 12. Effect of different levels of saline water on infection of tomato by *Botrytis cinerea*, the causal agent of gray mould / B. Boumaaza, S. Boudalia, A. Gacemi, et al. // *Indian Journal of Agricultural Research*. 2018. No. 52 (5). P. 530–535. doi: 10.18805/IJARE.A-327.
 13. Influence of growth stage and leaf age on expression of the components of partial resistance of faba bean to *Botrytis fabae* Sard / A. Bouhassan, M. Sadiki, B. Tivol, et al. // *Phytopathologia Mediterranea*. 2004. No. 43. P. 318–324.
 14. Gene action determining grain yield and chocolate spot (*Botrytis fabae*) resistance in faba bean / A. T. Beyene, J. Derera, J. Sibiyu, et al. // *Euphytica*. 2016. Vol. 207. No. 2. P. 293–304.
 15. Locating genes associated with *Ascochyta fabae* resistance in *Vicia faba* L. / C. M. Avila, Z. L. Satovic, B. Roman, et al. Cracow. 4th European Conference on Grain Legumes. 2001. P. 160–161.
 16. Resistance to ascochyta blight (*Ascochyta fabae*) in faba bean (*Vicia faba*) / J. C. Silero, C. M. Avila, M. T. Moreno, et al. Cracow. 4th European Conference on Grain Legumes. 2001. P. 188–194.
 17. Diseases of legume plants at the central part of Russia / E. A. Engalycheva, E. G. Kozar', E. P. Pronina, et al. International congress on oil and protein crops. Meeting of the EUCARPIA oil and protein crops section. Chisinau – May 20–24 2018. P. 130. ISBN 978-9975-3178-5-6.
 18. Перспективы селекции овощных культур семейства Fabaceae на устойчивость к вирусу желтой мозаики фасоли (*Potyvirus*, *Potyviridae*) в условиях Московской области / И. А. Енгальчева, Е. Г. Козарь, А. А. Антошкин и др. // Овощи России. 2018. № 6 (44). С. 77–83. doi: 10.18619/2072-9146-2018-6-77-83.
 19. Hampton R. O., Jensen A., Hagel G. T. Attributes of bean yellow mosaic potyvirus transmission from clover to snap beans by four species of aphids (Homoptera: Aphididae) // *Journal of economic entomology*. 2005. Vol. 98. No. 6. P. 1816–1823.
 20. De Ron A. M. Grain Legumes // *Handbook of Plant Breeding*. Pontevedra. 2015. doi:10.1007/978-1-4939-2797-5.
 21. Гнутова Р. В. Вирусные инфекции овощных бобовых культур и сои на Дальнем Востоке // Защита и карантин растений. 2013. № 1. 14–17.
 22. Русские белые – новый урожайный перспективный сорт бобов овощных (*Vicia faba* L.) / Е. П. Пронина, В. А. Ушаков, И. П. Котляр и др. // Овощи России. 2019. № 6 (50). С. 50–52. doi: 10.18619/2072-9146-2019-6-50-52.
 23. Исходный материал для селекции овощных бобовых культур в коллекции ВИР / М. А. Вишнякова, С. В. Бульницев, М. О. Бурляева и др. // Овощи России. 2013. № 1 (18). С. 16–25.
 24. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2014. 351 с.
 25. Овчинникова А. М., Андрюхина Р. М., Азарова Е. Ф. Методы ускоренной оценки селекционного материала бобовых культур на инфекционных и провокационных фонах: Методические рекомендации. М.: ВАСХНИЛ, ВНИИ зернобобовых и крупяных культур, 1990. 24 с.
 26. Пидопличко Н. М. Грибы – паразиты культурных растений. Определитель. Т. 1. Грибы совершенные. Киев: Наукова думка, 1977. 299 с.
 27. Билай В. И. Фузариоз (биология и систематика). Киев: Наукова думка, 1977. 442 с.
 28. Leslie J. F., Summerell B. A. *The Fusarium Laboratory Manual*. Blackwell Publishing. USA. 388 p.
 29. Simmons E. G. An aggregation of *Embellisia* species // *Mycotaxon*. 1983. Vol. 17. P. 216–241.
 30. Методические указания по апробации овощных и бахчевых культур. М.: Изд-во ФГБНУ ФНЦО, 2018. 224 с.

Поступила в редакцию 22.10.2021
 После доработки 02.12.2021
 Принята к публикации 14.01.22

**СЕМЕННАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ СОРТООБРАЗЦОВ ОВСЯНИЦЫ ТРОСТНИКОВОЙ
ГАЗОННОГО НАПРАВЛЕНИЯ**

В. М. Косолапов¹, доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН,
В. И. Чернявских¹, доктор сельскохозяйственных наук, **М. Н. Маринич**², аспирант

¹Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии им. В.П. Вильямса,
141055, Московская обл., Лобня, ул. Научный городок, корп. 1

²Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
308015, Белгород, ул. Победы, 85
Email: cherniavskih@mail.ru

Исследовали шесть перспективных селекционных образцов овсяницы тростниковой, созданных в результате биотипического отбора из популяций пойм малых рек, овражно-балочных земель и меловых обнажений юга Среднерусской возвышенности, в сравнении с районированными сортами газонного направления западноевропейского и российского происхождения (Меандр – стандарт, Дарина, Ивица, Файнлон). В 2017–2020 гг. изучали основные элементы семенной продуктивности (количество продуктивных стеблей на 1 м², количество семян в одной метелке, массу 1000 семян, урожай семян) и поражение листовой поверхности ржавчиной. Селекционный материал, происходящий из различных экотопов юга Среднерусской возвышенности, обладает высокой семенной продуктивностью. В среднем за 2018–2019 гг. потенциальный урожай семян перспективных сортобразцов достигал 92,4...160,3 г/м², достоверно превышая стандарт на 18,2...105,0 %. Выявлена положительная связь между величиной урожайности семян и изучаемыми признаками: количеством продуктивных стеблей ($r_s = 0,380...0,568$), количеством семян в одной метелке ($r_s = 0,409...0,802$), массой 1000 семян ($r_s = 0,818...0,946$), отрицательная – между урожайностью семян и поражённостью болезнями в фазе начала плодообразования ($r_s = -0,243...-0,441$), подтвержденные коэффициентом корреляции рангов Спирмена. Методом кластерного анализа можно ординировать группы сортобразцов и выделять общности со схожим происхождением.

SEED PRODUCTIVITY OF VARIETY SAMPLES OF FESCUE REED LAWN DIRECTION

Kosolapov V. M.¹, Cherniavskih V. I.¹, Marinich M. N.²

¹Federal Williams Research Center of Forage Production & Agroecology,
141055, Moskovskaya obl., Lobnya, ul. Nauchnyi gorodok, korp. 1

E-mail: cherniavskih@mail.ru
²Belgorod State University,
308015, Belgorod, ul. Pobedy, 85

Six promising breeding samples of reed fescue, created as a result of biotypic selection from populations of floodplains of small rivers, ravine-girder lands and cretaceous outcrops of the south of the Central Russian Upland, were studied in comparison with zoned lawn varieties of Western European and Russian origin (Meander (standard), Darina, Willow, Finlon). In the period 2017–2019 the main elements of seed productivity were studied (the number of productive stems per 1 m², the number of seeds in one panicle, the mass of 1000 seeds, the seed yield g/m²) and the damage to the leaf surface by rust. The breeding material of reed fescue, originating from various ecotopes of the south of the Central Russian Upland, has high seed productivity. On average, in 2018–2019, promising cultivars provided a potential seed yield of 92.4 to 160.3 g/m², significantly exceeding the standard by 18.2...105.0 %. A positive relationship was revealed between the value of seed yield and the studied signs: the number of productive stems ($r_s = 0.380...0.568$), the number of seeds in one panicle ($r_s = 0.409...0.802$), the weight of 1000 seeds ($r_s = 0.818...0.946$), a negative relationship between the value of seed yield and disease in the phase of the beginning of fruiting ($r_s = -0.243...-0.441$), confirmed by the Spearman rank correlation coefficient. By the method of cluster analysis, it is possible to ordinate groups of varietal samples and identify communities with similar origins.

Ключевые слова: *Festuca arundinacea*, селекция и семеноводство трав, дисперсионный анализ, кластерный анализ, урожай семян, исходный материал

Key words: *Festuca arundinacea*, grass breeding and seed production, analysis of variance, cluster analysis, seed yield, source material

Семеноводство многолетних трав становится в России и мире одной из важнейших отраслей сельскохозяйственного производства и экономики в целом [1, 2, 3].

Особое место занимает семеноводство злаковых трав и особенно – производство семян для газонов. Активное развитие индустрии выращивания газонов привело к значительным результатам в их селекции [4, 5, 6].

Наряду с крупными компаниями Дании, Германии, Нидерландов, США, такая работа ведется и в России. Несмотря на проводимые исследования и достигнутые результаты по улучшению качества травостоев различного назначения, острой остается проблема низкой семенной продуктивности многолетних трав [7, 8, 9].

Овсяница тростниковая (*Festuca arundinacea* Schreb.) ценная сельскохозяйственная культура различного

назначения, сорта которой широко используют как в сельскохозяйственном производстве, так и в других отраслях экономики. По оценкам специалистов потребность в семенах овсяницы тростниковой только вне сельскохозяйственного производства в России (для обустройства транспортных коммуникаций, мелиоративных мероприятий, зеленого строительства в городах, населенных и других мероприятий, не связанных с производством кормов), составляет более 1 т ежегодно. Однако сегодня более 70 % ее сортов, включенных в Государственный реестр селекционных достижений, зарегистрированы зарубежными правообладателями: DLF (Дания), Varenbrug (Нидерланды) и др. В связи с такой ситуацией необходимо активизировать работу с этой культурой [10, 11].

Сорта злаковых трав вообще и тростниковой овсяницы в частности, предназначенные для зеленого строительства, обладают рядом специфических особенностей, отличающих их от сортов кормового назначения. Они должны формировать низкий, густой травостой, иметь большое количество укороченных побегов с тонкой листовой пластинкой, хорошо отрастать при скашивании [12, 13].

Кроме того, сорта трав должны иметь высокую семенную продуктивность, что будет влиять на эффективность их дальнейшего использования. Поэтому репродуктивная способность селекционных образцов, наряду с декоративными и биолого-хозяйственными признаками, стала определять успешность создания новых форм трав газонного направления [14, 15].

Селекционеры отмечают необходимость продолжения работы с местным исходным материалом, адаптированным к сложным климатическим условиям нашей страны [16, 17]. Сохраняет свою актуальность биотипический отбор многолетних трав, с привлечением генетического материала дикорастущих популяций в качестве исходного материала для селекции [18].

Меловой юг Среднерусской возвышенности богат видами и формами диких родичей культурных растений, которые в силу геологических и климатических особенностей региона обладают высокой засухоустойчивостью. Среди злаковых трав широко распространены ксерофильные экотипы с мелкими узкими листьями, покрытыми восковым налетом. Эта особенность мелового субстрата как селективного фактора может способствовать формированию популяций ценных форм *F. arundinaceae*, пригодных для создания сортов газонного направления, обладающих рядом таких важных признаков, как засухоустойчивость, низкорослость, тонколистность, высокая семенная продуктивность и др. [19, 20].

Цель исследований – изучение селекционного материала овсяницы тростниковой, выделенного методом биотипического отбора в поймах малых рек, овражно-балочных землях и меловых обнажениях юга Среднерусской возвышенности по комплексу признаков семенной продуктивности, декоративности и устойчивости к болезням, в сравнении с селекционными сортами газонного направления.

Методика. Работу проводили в Белгородском районе Белгородской области (с. Драгунское) на базе семеноводческого предприятия ИП «С.А. Мавродин» в рамках программы изучения растительных ресурсов Мелового юга Среднерусской возвышенности, выполняемой совместно НИУ «БелГУ» и ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса».

Почвенный покров опытного участка представлен чернозёмом типичным с содержанием гумуса 4,9 % (ГОСТ 26213-84), P_2O_5 – 120 мг/кг, K_2O – 180 мг/кг (ГОСТ 26204-84), pH_{KCl} – 6,8 (ГОСТ 26483-85).

Период исследований характеризовался в целом пониженным, в сравнении со среднемноголетней нормой (553 мм), за исключением 2018 г., выпадением осадков (2018 г. – 693,6 мм, 2019 г. – 429,2 мм, 2020 г. – 437,1 мм) и повышенной среднегодовой температурой (2018 г. – 9,3 °С, 2019 г. – 10,4 °С, 2020 г. – 9,2 °С, среднемноголетняя норма – 6,3 °С).

В полевом опыте изучали 6 селекционных образцов трав (табл. 1), созданных на основе биотипического отбора из популяций пойменных экотопов, овражно-балочных комплексов и меловых обнажений, ранее выделенных в селекционном питомнике по хозяйственно-ценным признакам и повышенной семенной продуктив-

Табл. 1. Список изучаемых образцов

Селекционный номер	Происхождение селекционного образца
St	Селекционный сорт Меандре (Франция)
FA 1-1	Биотипический отбор из популяции мелового обнажения, с. Ватутино, Валуйский р-н, Белгородская обл.
FA 1-5	Биотипический отбор из популяции мелового обнажения, карьер цементного завода, г. Белгород
FA 1-10	Биотипический отбор из популяции мелового обнажения, урочище Белое городище, г. Белгород
FA 1-13	Селекционный сорт Дарина (Россия)
FA 1-15	Биотипический отбор из популяции мелового обнажения, урочище Белое городище, г. Белгород
FA 1-18	Биотипический отбор из популяции поймы реки Илэк, пгт Красная Яруга, Белгородская обл.
FA 1-22	Селекционный сорт Ивица (Россия)
FA 1-36	Биотипический отбор из популяции мелового обнажения, урочище Белое городище, г. Белгород
FA 1-26	Селекционный сорт Файнлон (Дания)

ности, в сравнении с широко используемыми в зеленом строительстве сортами газонного направления Меандре (Франция), Файнлон (Дания), а также недавно созданными сортами Дарина (Россия) и Ивица (Россия).

Посев проводили летом 2017 г. ручной сеялкой в чистом виде с нормой высева 200 всхожих семян на 1 погонный метр. Закладывали двухрядковые делянки длиной 2 м с шириной междурядья 0,3 м. Повторность опыта четырехкратная, полная рендомизация, стандарт – сорт Меандре высевали через каждые 4 номера.

Изучали такие признаки, которые характеризуют семенную продуктивность, как количество продуктивных стеблей на 1 м², количество семян в одной метёлке, массу 1000 семян, урожай семян с 1 м² [21]. Учет урожая проводили путем сплошной уборки растений в снопы с дальнейшим обмоломом и доведением до стандартной чистоты и влажности. Устойчивость сортообразцов к ржавчине осуществляли путем осмотра 200 растений на делянке в фазе начала плодобразования с определением пораженности листьев по шкале Петерсона [22].

Обработку полученных данных выполняли методом дисперсионного анализа [23]. Для выявления многомерных связей, группировки и комплексной оценки образцов применяли кластерный анализ. Кластерный анализ проведен методом самого дальнего соседа (полная связь), метрика расстояния – Евклидова. В анализ помимо изучаемых селекционных признаков семенной продуктивности, включали показатели пораженности листовой поверхности сортообразцов ржавчиной, величину урожая надземной массы и общее количество побегов. Использовали ППС Statsgrafics.

Для выявления связей между отдельными изучаемыми результативными признаками использовали корреляционный анализ рангов Спирмена [24].

Результаты и обсуждение. Количество продуктивных стеблей, сформированное селекционными образцами в среднем по опыту, повышалось по мере увеличения возраста травостоев и варьировало от 272,6±22,8 шт./м² в 2018 г. до 381,6±26,5 шт./м² в 2020 г. (табл. 2).

Табл. 2. Основные элементы семенной продуктивности и урожайность различных сортов и селекционных образцов овсяницы тростниковой в условиях Белгородской области (в среднем 2018–2020 гг.)

Сортообразец	Количество продуктивных стеблей, шт./м ²		Количество семян в 1 метелке, шт.		Масса 1000 семян, г		Урожайность семян, г/м ²	
	М	Cv,%	М	Cv,%	М	Cv,%	М	Cv,%
Сорт Меандре – ст.	294,0	12,1	123,0	1,2	2,30	4,4	78,2	15,9
FA 1-1	366,3	19,5	138,9	4,7	2,50	2,4	120,1	24,0
FA 1-5	363,0	15,3	152,9	2,0	2,83	2,2	147,0	14,7
FA 1-10	350,7	16,7	139,0	1,9	2,97	2,4	135,2	15,5
FA 1-13 – сорт Дарина	369,3	19,5	150,3	3,4	2,55	1,5	132,1	16,0
FA 1-15	362,8	16,7	150,0	1,2	2,71	3,1	137,7	14,6
FA 1-18	334,7	31,0	136,3	4,0	3,71	1,5	160,3	34,6
FA 1-22 – сорт Ивица	353,0	18,6	137,7	4,4	2,67	3,0	121,7	19,7
FA 1-36	350,0	13,6	155,5	2,0	2,59	0,8	131,8	12,4
FA 1-26 – сорт Файнлон	292,0	15,2	127,3	3,3	2,65	1,5	92,4	15,8
НСР ₀₅	32,9		7,3		0,12		22,6	

В 2018 г. достоверно меньшее количество продуктивных побегов (на 13,3 % ниже стандарта) формировал сортообразец FA 1-18, сорт Файнлон находился на уровне стандарта, у остальных сортообразцов величина этого показателя была достоверно больше, чем у стандарта Меандре, на 12,1...20,6 %. В 2019 г. все сортообразцы за исключением сорта Файнлон, находившегося на уровне стандарта, превосходили сорт Меандре на 15,1...26,7 %, что в абсолютных величинах составляло 48...85 шт./м². В среднем за вегетационный период 2020 г. в посевах изучаемых сортообразцов формировалось 316...400 шт./м² продуктивных побегов. Отмечено значительное превосходство образцов местной селекции над стандартом на 20,6...32,9 %, у сорта Файнлон число продуктивных побегов находилось на уровне сорта Меандре.

В среднем за 2018–2020 гг. лучшими по количеству продуктивных побегов были образцы: FA 1-13 (сорт Дарина), превысивший стандарт по величине этого показателя на 75,3 шт./м² (25,6 %), сортообразец FA 1-1 превзошедший стандарт на 72,3 шт./м² (24,6 %), FA-1-5 превысивший стандарт на 69,0 шт./м² (23,5 %) и FA 1-15 превзошедший стандарт на 68,8 шт./м² (23,4 %). Количество продуктивных стеблей – это наиболее варьирующий селекционный признак семенной продуктивности различных сортов и сортообразцов, зависящий от условий года возделывания и возраста травостоя (Cv = 12,1...31,0 %). В среднем по всем сортообразцам в среднем за 3 года коэффициент вариации (Cv) составил 17,9 %.

Количество семян в одной метелке, один из селекционных признаков семенной продуктивности, четко характеризующий особенности генотипа сортообразцов, в значительно меньшей степени зависел от условий года возделывания и возраста травостоя. Внутрисортовое варьирование количества семян в одной метелке в среднем за 3 года изменялось незначительно. Величина коэффициента вариации (Cv) составляла 1,2...4,4 %.

В 2018 г. в 1 метелке различных сортообразцов овсяницы тростниковой формировалось от 124,0 до 156,3 шт. семян. У сортообразцов FA 1-5, FA 1-10, FA 1-13, FA 1-15, FA 1-36 в условиях этого года их было достоверно больше (на 15...26 %), чем у стандарта сорта Меандре. Остальные образцы оставались на уровне стандарта. В

2019 г. при среднем количестве семян в метелке по опыту 142,6±8,2 шт., все изученные сортообразцы достоверно превосходили стандарт на 10,7...29,7 шт. на метелку (на 8,8...28,9 %). В 2020 г. такая картина сохранилась. Все сорта и сортообразцы местной селекции превосходили стандарт на 14,0...26,7 %, а у сорта Файнлон количество семян в метелке находилось на уровне стандарта (126,0 шт., против 124,3 шт.).

В среднем за 3 года исследований наибольшее количество семян формировалась в метелке сортообразцов FA 1-5 (152,9 шт.), FA 1-13 (150,3 шт.), FA 1-15 (150,0 шт.) и FA 1-36 (155,5 шт.), что соответственно на 24,3; 22,2; 22,0; 26,4 % больше, чем у стандарта.

Масса 1000 семян – важнейший признак при селекции на семенную продуктивность, в период исследований величина этого показателя отличалась низким варьированием. В 2018 г. в среднем по опыту она составляла 2,76±0,25 г. Все изучаемые образцы и сорта достоверно превышали стандарт на 10,7...63,7 %. В 2019 г. средняя масса 1000 семян составила 2,75±0,24 г. В целом, изучаемые селекционные образцы и сорта не уступали стандарту. Достоверное превосходство на 13,5...54,3 % отмечено у селекционных образцов FA 1-5, FA 1-10, FA 1-15, FA 1-18. В 2020 г. средняя по опыту масса 1000 семян находилась в пределах 2,74±0,27 г. Все образцы достоверно на 13,6...66,4 %, превысили стандарт.

В среднем за 2018–2020 гг. у всех селекционных номеров и сортов масса 1000 семян была на уровне или выше стандарта на 5,2...48,8 %. Наибольшей величиной этого показателя отличались образцы FA 1-18, FA 1-10 и FA 1-5, которые превзошли стандарт соответственно на 61,2 %; 28,9 % и 22,9 % при абсолютной массе 1000 семян 3,71 г, 2,97 г и 2,83 г против 2,26 г у стандарта.

В среднем по опыту отмечена тенденция формирования максимального урожая на третий год жизни травостоев (второй год использования семенных травостоев). В 2018 г. в среднем по опыту он составил 99,1±15,2 г/м². Все изучаемые селекционные образцы и сорта достоверно превысили стандарт по величине этого показателя на 11,4...58,9 г/м² (17,8...91,9 %). В 2019 г. в среднем по опыту урожайность находилась на уровне 139,5±20,46 г/м². Все селекционные образцы и сорта достоверно превосходили стандарт на 13,6...110,1

Табл. 3. Результаты однофакторного дисперсионного анализа элементов семенной продуктивности и урожайности овсяницы тростниковой

Признак	Источник вариации	D*	n-1	s ²	F _f	F _{0,05}	h ² _x
Количество продуктивных стеблей, шт./м ²	общее	104613,3	29				100,0
	условия года	76019,4	2				72,7
	сортообразец	21913,5	9	2434,8	6,6	2,7	20,9
	случайное	6680,4	18	371,1			6,4
Количество семян в 1 метелке, шт.	общее	3582,0	29				100,0
	условия года	40,2	2				1,1
	сортообразец	3213,8	9	357,1	19,6	2,7	89,7
	случайное	328,0	18	18,2			9,2
Масса 1000 семян, г	общее	4,060	29				100,0
	условия года	0,004	2				0,1
	сортообразец	3,973	9	0,441	95,3	2,7	97,9
	случайное	0,083	18	0,005			2,1
Урожай семян, г/м ²	общее	29848,2	29				100,0
	условия года	10566,1	2				35,4
	сортообразец	16124,2	9	1791,6	10,2	2,7	54,0
	случайное	3158,0	18	175,4			10,6

*D – сумма квадратов отклонений (девианта); s² – дисперсия; n-1 – число степеней свободы; h²_x – сила влияния на резульативный признак. F_f – фактическое значение F-критерия Фишера; F_{0,05} – табличное значение F – критерия Фишера при уровне значимости оценки 5 %.

г/ м² (15,5...125,4 %). В 2020 г. при средней урожайности по опыту 138,4±20,23 г/ м² сохранилась тенденция предыдущих лет – все образцы достоверно превышали стандарт на 17,7... 103,7 г/ м² (21,5...125,7 %).

В среднем за 2018–2020 гг. необходимо отметить низкую семенную продуктивность стандарта – сорта Меандре. У всех без исключения изучаемых генотипов она была на 18,2...105,0 % выше. Несмотря на высокое качество и декоративность газонных травостоев, стандарт характеризуется пониженной семенной продуктивностью в условиях Белгородской области. Особенно необходимо выделить образец FA 1-18, полученный в результате биотипического отбора из популяции поймы реки Илэк (пгт Красная Яруга, Белгородская обл.). Формируя урожайность семян от 96,6 до 197,8 г/м², он превосходил стандарт на 32,5...125,4 %.

В результате дисперсионного анализа выявлено, что организованные факторы, изученные в опыте, оказывают достоверное влияние как на основные резульативные признаки (элементы семенной продуктивности), так и на урожай семян изучаемых сортов овсяницы тростниковой (табл. 3).

Количество формируемых продуктивных стеблей в значительно большей степени зависело от условий года (комплекс метеоусловий и возраст травостоя) с h²_x = 72,7 %, чем от генетических особенностей изучаемых сортов (h²_x = 20,9 %). По фактору «сортообразец» F_f > F_{0,05} и необходимо отвергнуть нулевую гипотезу о влиянии сортов, при низкой силе случайных факторов h²_x = 6,4 %.

Фактор «сортообразец», характеризующий генотип, оказывал значительно большее, чем условия года, влияние на резульативные признаки «количество семян в одной метелке» и «масса 1000 семян» – соответственно h²_x = 89,7 % и h²_x = 97,9 %, что может свидетельствовать о большей эффективности отбора по этим признакам при селекции на семенную продуктивность, в сравнении с признаком «количество продуктивных стеблей».

При анализе результатов комплексного резульативного признака «урожайность семян» в среднем за 2018–2020 гг. нулевую гипотезу влияния фактора «сортообразец» необходимо отвергнуть на уровне значимости оценки 5 % (F_f/F_{0,05} = 3,78) при силе его влияния h²_x = 54 %. Сила влияния условий года была меньше и составляла h²_x = 35,4 %. Ранее аналогичные данные были получены в опытах с овсяницей красной [25].

Оценка пораженности листьев растений овсяницы тростниковой ржавчиной по шкале Петерсона выявила ряд значительных отличий сортообразцов, несмотря на географическую общность их происхождения (рис. 1). В среднем за 2018–2020 гг. в наименьшей степени

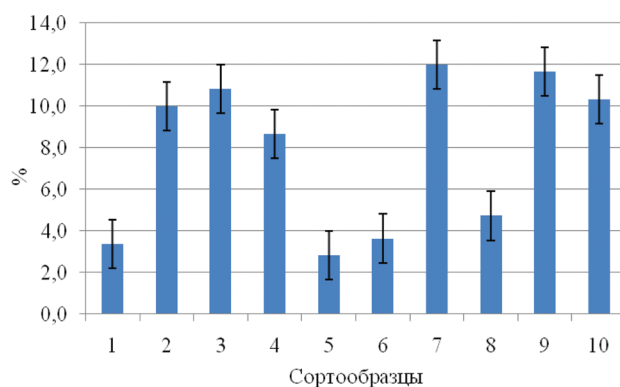


Рис. 1. Пораженность ржавчиной различных сортообразцов овсяницы тростниковой в среднем за 2018–2020 гг. (по оси абсцисс – пораженность ржавчиной, %; по оси ординат – сортообразцы: 1 – Меандре, st; 2 – FA 1-1; 3 – FA 1-5; 4 – FA 1-10; 5 – FA 1-13 (Дарина); 6 – FA 1-15; 7 – FA 1-18; 8 – FA 1-22 (Ивица); 9 – FA 36; 10 – FA 1-26 (Файнлон); планки погрешностей обозначают стандартное отклонение).

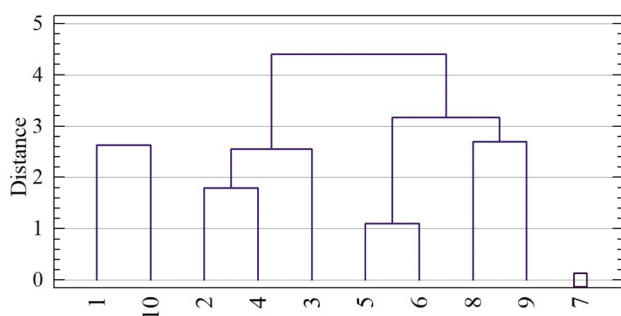


Рис. 2. Результаты кластерного анализа, характеризующие сходство сортообразцов овсяницы тростниковой (по оси абсцисс – расстояние; по оси ординат – сортообразцы: 1 – Меандре, st; 2 – FA 1-1; 3 – FA 1-5; 4 – FA 1-10; 5 – FA 1-13 (Дарина); 6 – FA 1-15; 7 – FA 1-18; 8 – FA 1-22 (Ивица); 9 – FA 36; 10 – FA 1-26 (Файнлон)).

поражались стандарт – сорт Меандре (2,8...3,9 %) и сортообразец FA 1-13 – сорт Дарина (2,5...3,0 %), на уровне стандарта находились образцы FA 1-15 (2,9...4,2 %), FA 1-22 – сорт Ивица (3,4...7,4 %). Пораженность растений других генотипов в зависимости от года исследований достигала 9,0...16,0 % и была значительно больше, чем у стандарта.

По результатам разбиения всех селекционных образцов на общности методом кластерного анализа выделены три кластера, объединяющих в своем составе сортообразцы наиболее схожие по всему комплексу изучаемых признаков (рис. 2). Установлено четкое разбиение селекционных образцов по принципу их экологического и географического происхождения.

В первый кластер вошли два селекционных сорта: Меандре (Франция) и Файнлон (Дания). Они относятся к западноевропейскому типу пойменных сортов и, по видимому, объединены общностью генотипа.

Ко второму кластеру отнесены сортообразцы, объединившиеся по принципу общности экологического происхождения исходного материала из экотопов с карбонатными почвами и меловыми обнажениями. В этот же кластер вошли сорта Ивица (Россия) и Дарина (Россия), включающие в свои генотипы исходный материал биотипического отбора из популяций меловых обнажений, то есть между ними имеется генетическая близость.

Третий кластер, представлен одним образцом FA 1-18, полученный в результате биотипического отбора из популяций поймы реки Илэк (Белгородская обл.) с высокоплодородными пойменными почвами, слабнокислой реакции и высоким содержанием гумуса. Он характеризовался значительно большей семенной продуктивностью, крупнолистностью травостоя, высотой и самой высокой массой 1000 семян.

Определение связей изучаемых признаков методом корреляционного анализа рангов Спирмена показало различную тесноту корреляции между величиной урожайности семян и изучаемыми признаками: с количеством продуктивных стеблей – от слабой до средней положительной ($r_s=0,380...0,568$); с количеством семян в одной метелке – от средней до сильной ($r_s=0,409...0,802$); с массой 1000 семян – сильная положительная ($r_s=0,818...0,946$); с урожаем зеленой массы корреляционная связь не установлена, но тенденция отрицательная ($r_s=-0,088...-0,243$); с пораженностью болезнями в фазе начала плодообразования – слабая отрицательная ($r_s=-0,243...-0,441$). При этом связь, между поражением

растений ржавчиной и урожайностью зеленой массы, подтвержденная корреляцией рангов Спирмена, была сильная положительная ($r_s=0,943...0,992$).

Таким образом, селекционный материал овсяницы тростниковой, происходящий из экотопов пойм, овражно-балочных комплексов и меловых обнажений юга Среднерусской возвышенности, обладает высокой семенной продуктивностью и в этих условиях превосходит по урожаю семян образцы западноевропейского происхождения.

Методом кластерного анализа возможно ординировать группы сортов по комплексу признаков, характеризующих их продуктивность, и выделять общности со схожим происхождением.

Наиболее важные признаки при селекции на семенную продуктивность в условиях юга Среднерусской возвышенности – масса 1000 семян, количество семян в одной метелке, поражение ржавчиной.

Количество продуктивных стеблей на единице площади нельзя использовать при отборе как самостоятельный показатель, а необходимо применять только совместно с ранее перечисленными признаками.

Литература

1. Malaval S., Dupin B., Dantin G. Conservation et restauration de la flore dans un contexte anthropisé, quelles solutions? // *Sci. Eaux Territ.* 2015. Vol. 16. P. 70–75.
2. Multivariate characteristics of selected grass varieties for seed production / M. Iwańska, D. Martyniak, M. Martyniak, et al. // *Czech journal of genetics and plant breeding.* 2019. Vol. 55. No. 2. P. 83–86.
3. Опыт селекции и семеноводства люцерны и других трав в ЗАО «Краснояржужская зерновая компания» / В. И. Чернявских, А. Г. Титовский, Р. А. Шарко, О. В. Шинкаренко и др. // *Достижения науки и техники АПК.* 2012. № 12. С. 14–17.
4. Ostapets T. Comparative Characteristics of Main Morphological Indication and Type of Inheritance of Leaf Plate Color in Species *Festuca Glauca*, *Festuca Rubra*, *Festuca Ovina* // *Norwegian Journal of Development of the International Science.* 2020. No. 51–2. P. 15–17.
5. Tate T. M., Bonos S. A., Meyer W. A. Breeding and Evaluation of Fine Fescues for Increased Tolerance to Mesotrione Herbicide // *HortTechnology.* 2021. Vol. 31. No 3. P. 315–326.
6. Scotton M. Grassland Restoration at a Graded Ski Slope: Effects of Propagation Material and Fertilisation on Plant Cover and Vegetation // *Agriculture.* 2021. Vol. 11. No. 5. P. 381.
7. Menon-Martinez F. E., Grimoldi A. A., Striker G. G. Variability among *Festuca arundinacea* cultivars for tolerance to and recovery from water logging, salinity and their combination // *Crop and Pasture Science.* 2020. Vol. 72 (1). P. 75–84.
8. Косолапов В. М., Трофимов И. А. Кормопроизводство в экономике сельского хозяйства // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук.* 2010. № 1. С. 31–32.
9. Чернявских В. И. Рекуррентная селекция как основа повышения продуктивности люцерны в Центрально-Чернозёмном регионе // *Кормопроизводство.* 2016. № 12. С. 40–44.
10. Schiavon M., Stefano M., Pornaro C. Response of Twenty Tall Fescue (*Schedonorus arundinaceus* (Schreb.) Cultivars to Low Mowing Height / M. M. Schiavon, Stefano, Pornaro C. // *Agronomy.* 2021. VOL. 11. N 5. P. 943.

11. Золотарев В. Н., Переправо Н. И. Состояние и перспективы семеноводства овсяницы тростниковой в России // Труды Кубанского ГАУ 2018. № 72. С. 158–160.
12. Исследования различных сортов отечественной и зарубежной селекции для создания газонов различного назначения / Т. В. Кулаковская, Е. С. Костенко, С. И. Костенко и др. // Мелиорация. 2006. № 1 (55). С. 140–143.
13. Юферева Н. И., Шанникова М. А. Оценка травосмесей для создания устойчивых газонных фитоценозов в условиях Кировской области // Адаптивное кормопроизводство. 2019. № 4. С. 78–88.
14. Зубарев Ю. Н., Субботина Я. В., Стряпунина М. А. Влияние нормы высева на формирование густоты газонных фитоценозов на основе трав отечественной селекции // Пермский аграрный вестник. 2018. № 2 (22). С. 49–54.
15. Schiavon M., Pornaro C., Macolino S. Tall Fescue (*Schedonorus arundinaceus* (Schreb.) Dumort.) Turfgrass Cultivars Performance under Reduced N Fertilization // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. No. 5. P. 193.
16. Кормопроизводство – важный фактор роста продуктивности и устойчивости земледелия / В. М. Косолапов, И. А. Трофимов, Л. С. Трофимова и др. // Земледелие. 2012. № 4. С. 20–22.
17. Природные генетические ресурсы кормовых растений Смоленской области / Н. Н. Козлов, Н. С. Малюженец, В. Л. Коровина и др. // Адаптивное кормопроизводство. 2016. № 1. С. 28–39.
18. Думачева Е. В., Чернявских В. И. Биологический потенциал бобовых трав в естественных сообществах эрозионных агроландшафтов Центрального Черноземья // Кормопроизводство. 2014. № 4. С. 8–11.
19. Чернявских В. И. Продуктивность бобово-злаковых травосмесей и эффективность их возделывания на склоновых землях юго-запада ЦЧЗ // Достижения науки и техники АПК. 2009. № 7. С. 42–45.
20. Чернявских В. И. Эффективность возделывания бобовых и злаковых трав на склоновых землях юго-запада ЦЧЗ // Земледелие. 2009. № 6. С. 18–19.
21. *Guidelines For The Conduct Of Tests For Distinctness, Homogeneity and Stability*. TG/39/6 Original: German/allemand/deutsch Date/Datum: 1984. 11-07. URL: https://www.upoVol.int/edocs/tgdocs/en/tg039_06.pdf. (дата обращения: 20.11.2021 г.).
22. Peterson R. F., Campbell A. B., Hannah A. E. A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals // *Canad. J. Res.* 1948. Vol. 26. P. 496–500.
23. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: (С основами статистической обработки результатов исследований). Москва: Книга по Требованию, 2012. 352 с.
24. Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: Высш. школа, 1990. 352 с.
25. Косолапов В. М., Чернявских В. И., Маринич М. Н. Формирование элементов семенной продуктивности у сортообразцов овсяницы красной: селекционный подход // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 6. С. 24–28.

Поступила в редакцию 13.11.2021

После доработки 20.12.2021

Принята к публикации 19.01.2022

УСТОЙЧИВОСТЬ ОБРАЗЦОВ КОНКУРСНОГО СОРТОИСПЫТАНИЯ И СОРТОВ РИСА *Oryza sativa* L. ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ СЕЛЕКЦИИ К ПИРИКУЛЯРИОЗУ

М.В. Илюшко¹, кандидат биологических наук, С.С. Гученко¹, В.Н. Лелявская², С.В. Безмутко²,
М.В. Ромашова¹, кандидат сельскохозяйственных наук

¹Федеральный научный центр агроботаники Дальнего Востока им. А.К. Чайки,
692539, Приморский край, п. Тимирязевский, ул. Воложенина, 30
E-mail: ilyushkoiris@mail.ru

²Дальневосточный научно-исследовательский институт защиты растений – филиал «ФНЦ агроботаники Дальнего Востока им. А.К. Чайки»,
692684, Приморский край, с. Камень-Рыболов, ул. Мира, 42а
E-mail: dalniizr@mail.ru

Проведена оценка урожайности и устойчивости четырех районированных сортов риса *Oryza sativa* L. и четырех образцов конкурсного сортоиспытания к пирикуляриозу, вызываемому грибом *Pyricularia oryzae* Cav., на искусственном инфекционном фоне в условиях Приморского края. Инокуляцию растений риса проводили методом опрыскивания водной суспензией конидий гриба *P. oryzae*. С использованием молекулярных маркеров в образцах риса конкурсного сортоиспытания идентифицировали аллели шести генов устойчивости к пирикуляриозу риса (*Pi-2*, *Pi-9*, *Pi-b*, *Pi-z(t)*, *Pi-1* и *Pi-ta²*). По результатам трехлетних исследований в конкурсном сортоиспытании выделен образец риса 103/5-2-10 с урожайностью 35,7 ц/га, что выше стандарта на 6,0 ц/га. Сорта Алмаз с геном *Pi-z* и Долинный с геном *Pi-ta²* демонстрируют стабильно среднеустойчивый тип реакции к различным наборам штаммов *P. oryzae*, циркулирующим на территории Приморского края (индекс устойчивости 8,2 и 8,1 соответственно). У остальных образцов индекс устойчивости составил 10,0...13,7, что свидетельствует о их восприимчивости. Наличие аллеля устойчивости гена *Pi-2* не дает преимуществ в иммунитете генотипам риса дальневосточной селекции.

RESISTANCE OF FAR EASTERN RICE *Oryza sativa* L. VARIETIES AND COMPETITIVE TESTING SAMPLES TO *PYRICULARIA ORYZAE* CAV.

Ilyushko M.V.¹, Guchenko S.S.¹, Lelyavskaya V.N.², Bezmutko S.V.², Romashova M.V.¹

¹Federal Scientific Centre of Agrobiotechnology of the Far East named A.K. Chaika,
692539, Primorskiy kray, p. Timiryasevskiy, ul. Volozhenina, 30
E-mail: ilyushkoiris@mail.ru

²Far Eastern Research Institute of Plant Protection – Branch of «Federal Scientific Centre of Agrobiotechnology of the Far East named A.K. Chaika»,
692684, Primorskiy kray, vl. Kamen-Rybolov, ul. Myra, 42a
E-mail: dalniizr@mail.ru

Yield and resistance to blast disease caused by the fungus *Pyricularia oryzae* Cav. on an artificial infectious background in the Primorsky Territory conditions was carried out for *Oryza sativa* L. varieties and competitive testing samples. Rice plants were inoculated by spraying with an aqueous suspension of *P. oryzae* conidia. Alleles of six genes for resistance to rice blast disease (*Pi-2*, *Pi-9*, *Pi-b*, *Pi-z(t)*, *Pi-1* and *Pi-ta²*) were identified for competitive testing samples with molecular markers. According to the results of three-year research in a competitive testing, rice sample 103/5-2-10 with a yield of 3.57 t/ha was selected, which is 0.6 t/ha higher than the standard. The Almaz variety with the *Pi-z* gene and Dolinny variety with the *Pi-ta²* gene demonstrate a stable medium-resistant type of reaction to various sets of *P. oryzae* strains circulating in the Primorsky Territory (resistance index was 8.2 and 8.1, respectively). For the rest of the samples, the resistance index was 10.0-13.7, which indicates the varieties susceptibility. The presence of the resistance allele of the *Pi-2* gene does not give an advantage in immunity to the rice varieties of the Far Eastern selection.

Ключевые слова: *Oryza sativa*, урожайность, индекс устойчивости, гены устойчивости *Pi*

Key words: *Oryza sativa*, yield, sustainability index, blast gene resistance *Pi*

Рис *Oryza sativa* L. – высокозначимая культура для земледелия Приморского края. На этой территории его возделывают более 100 лет, с увеличением и сокращением посевных площадей. Значительные колебания рисосеяния на Дальнем Востоке связаны, в том числе с недостатком устойчивых к грибным болезням сортов [1]. На современном этапе развития рисоводства важную роль играет совершенствование защиты культуры от наиболее опасного заболевания – пирикуляриоза, которое серьезно лимитирует формирование стабильно высоких урожаев риса в регионе [2, 3].

В решении этой проблемы большую роль играют сорта, устойчивые к болезням, которые можно выращивать без использования дорогостоящих и токсичных фунгицидов [4, 5]. *Pyricularia oryzae* Cav. (*Magnaporthe oryzae* B. Couch) входит в десятку наиболее вредоносных

грибных патогенов сельскохозяйственных растений [6]. Над созданием толерантных к пирикуляриозу сортов риса работают в большинстве рисосеющих стран мира. Для этой цели широко используют молекулярные маркеры целевых генов, которых известно несколько десятков [4, 7, 8]. Для Приморского края эффективными считают следующие из них: *Pi-9*, *Pi-z(t)*, *Pi-b* и *Pi-ta²* [9, 10].

В сортах риса дальневосточной селекции молекулярно-генетическими методами идентифицированы гены устойчивости к пирикуляриозу [11]. При оценке устойчивости части сортов принудительным заражением приморскими изолятами фитопатогена в условиях вегетационного домика они отнесены к средне- и слабоустойчивым [2, 12]. Таким образом, в дальневосточной зоне рисосеяния нет иммунных сортов, абсолютно устойчивых ко всем расам возбудителя пирикуляриоза [2].

Цель исследования – оценка урожайности и устойчивости районированных сортов риса и образцов конкурсного сортоиспытания к пирикулярриозу на искусственном инфекционном фоне в условиях Приморского края.

Методика. Работу проводили на четырех образцах риса *O. sativa* конкурсного сортоиспытания и четырех районированных сортах: Долинный, Алмаз (два последних, внесенных в Государственный реестр селекционных достижений РФ), Дальневосточный (самый давний зарегистрированный сорт), Приморский 29 – контроль (используется с этой целью в Госсортоиспытании по 12 зоне).

Рис выращивали на экспериментальной оросительной системе ФГБНУ «ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки» в 2019–2021 гг. согласно разработанной для Приморского края технологии. Почва опытного участка лугово-глеявая, тяжелосуглинистая, пахотный горизонт 17 см. Содержание органического вещества 2,8 %, подвижных форм фосфора 42,0 мг/кг почвы, калия – 203,2 мг/кг, рН – 5,2 (по ГОСТ 26213-92, ГОСТ Р 54650-2011 и ГОСТ 26483-85). Предшественник – чистый пар. В качестве основного удобрения использовали диаммофоску в дозе $N_{30}P_{78}K_{78}$. Подкормку в дозе N_{46} проводили карбамидом. Режим орошения – укороченное затопление. При постановке эксперимента руководствовались методикой селекционных работ ВНИИ риса [13]. Повторность опыта четырехкратная, площадь делянки 25 м², посев рядовой сеялкой СН-16, норма высева 7 млн всхожих зерен на 1 га. Урожай учитывали методом сплошного обмолота.

Изучение устойчивости к пирикулярриозу проводили в условиях вегетационного домика с применением методики М. Yamada et al. [14] и «Методических указаний ...» [15]. Использовали изоляты фитопатогена *P. oryzae* из микологической коллекции центра и моноспоровые изоляты, выделенные из гербарного материала, собранного в производственных посевах риса в Приморском крае. Набор изолятов в годы исследований различался на 80 % и составлял 10...14 шт. В 2019 г. использовали изоляты Л₁₃, ВП₁₀, В_{18с}, В_{18ч}, Лл₀₆₋₁₆, Пл₁₇, Хпч₁₈, Лст₁₂₋₁₄, Пл₁₆, НИОС₁₇; в 2020 г. – К-Р, Р₀₇₂, Нв_{9с}, Р₀₈₇, 4С₀₈, Л₀₆, Пл₁₇, ХП₁₇, ЛЛК, Н₁₀, М₁₀₋₁; в 2021 г. – ЛСТ₁₂, Гр₀₇, Л₀₅₋₁, Лу₁₁, Л₀₅₋₂, Чк₂₀, Нус₀₈, 4_{ач}, Чк_{20с}, 4_с, Пл₁₆, 5, Пл₁₇, Лст₁₂₋₁₄. Различия в наборах штаммов обусловлены выбором наиболее жизнеспособных из них с высокой спорулирующей способностью. Рассчитывали индекс устойчивости (I_р) к пирикулярриозу как сумму среднего и высшего баллов поражения, его величина варьирует в пределах от 0 до 15. Увеличение устойчивости сопровождается уменьшением значения индекса.

В четырех образцах риса конкурсного сортоиспытания идентифицировали аллели шести генов устойчивости к пирикулярриозу риса (*Pi-2*, *Pi-9*, *Pi-b*, *Pi-z(t)*, *Pi-1* и *Pi-ta²*). ДНК выделяли из 25 растений каждого образца по методике приведенной ранее [11, 16]. Для генов *Pi-1*, *Pi-2* и *Pi-b* использовали соответственно маркеры Rm224, Rm527 и Pi-b, предложенные [8], для гена *Pi-z(t)* – маркер аналогичного названия [5], гены *Pi-9* и *Pi-ta²* маркировали праймерами Pi-9 и Pi-ta² [17]. Реакцию проводили в 25 мкл реакционной смеси, содержащей 10×ПЦР буфер, 2,5 мМ MgCl₂, 0,2 мМ dNTP, по 0,5 мкл прямого и обратного праймеров, 1 ед. Taq ДНК-полимеразы и по 70...120 нг ДНК исследуемых образцов. Амплификацию осуществляли в двухкратной повторности. Использовали температурные профили реакций, рекомендованные в работах [5, 8, 17].

Продукты амплификации разделяли электрофоретически в 1,4 %-ном агарозном геле на основе 0,5×TBE буфера и визуализировали в ультрафиолетовом свете с использо-

ванием системы гель-документирования, предварительно окрашивая 1,0 %-ным раствором бромистого этидия.

Метеоусловия вегетационных периодов 2019–2021 гг. в целом соответствовали биологическим требованиям культуры риса. Сумма активных температур несколько превышали среднепогодную, исключение составил прохладный июнь 2019 г. Почвенной влаги в мае в течение трех лет было достаточно для получения дружных всходов.

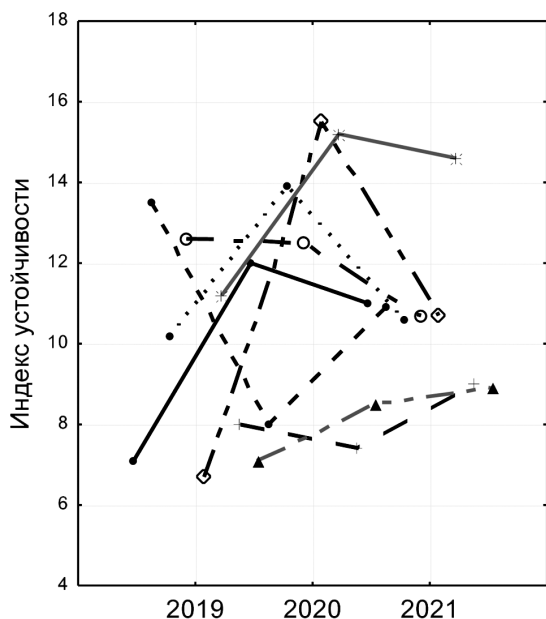
Результаты и обсуждение. Средняя урожайность сортов риса за 3 года исследований составила 26,3...34,7 ц/га. Образец конкурсного сортоиспытания 103/5-2-10 значимо превышал контрольный и большинство других образцов по урожайности – 34,7 ц/га. Районированные сорта имели одинаковую урожайность в пределах 27,9...30,5 ц/га (табл. 1).

Табл. 1. Характеристика образцов конкурсного сортоиспытания и сортов риса *Oryza sativa* L., средние показатели за 2019–2021 гг.

Образец, сорт	Урожайность, ц/га	Индекс устойчивости
Приморский 29 (контроль)	28,7	10,0
403-16	30,8	10,8
130-9-10	26,3	11,6
103/5-2-10	34,7	11,9
408-15	31,1	11,0
Дальневосточный	30,5	13,7
Долинный	28,9	8,1
Алмаз	27,9	8,2
Результаты дисперсионного анализа	$F_{\phi} = 3,33$, $F_{05} = 2,84$ $HCP_{05} = 4,15$	$F_{\phi} = 2,06$, $F_{05} = 2,84$

Изученные сорта характеризовались как слабо- и среднеустойчивые к пирикулярриозу (см. табл. 1). Анализ данных по годам позволил выделить сорта Алмаз и Долинный как стабильно толерантные к фитопатогену – I_р=8,1...8,2. Контроль Приморский 29 и образцы конкурсного сортоиспытания 408-15 и 403-16 в отдельные годы вели себя как среднеустойчивые – I_р=7,1...8,0, а в другие годы при заражении иным набором штаммов пирикулярриоза, как поражаемые – I_р более 10 (см. рисунок). Варьирование в значениях I_р нивелировало фактический критерий Фишера в дисперсионном анализе, поэтому достоверных различий по величине этого показателя не выявлено. У растений риса сорта Алмаз определен устойчивый аллель гена *Pi-z*, у Долинного – *Pi-ta²* [11, 16]. Их наличие гарантировало растениям этих сортов стабильно среднеустойчивый фенотип. В Приморском 29 выявлен аллель устойчивости гена *Pi-2*. В Дальневосточном ни одного из шести детектируемых генов не подтверждено [11]. В результате три сорта ведут себя как среднеустойчивые лишь к отдельным приморским штаммам пирикуляррии, в остальных случаях наблюдается их поражаемость. Приморские исследователи часто используют сорт Дальневосточный в качестве контрольного варианта. На протяжении длительного времени он демонстрирует высокую восприимчивость к *P. oryzae* с индексом I_р=11,5...13,6 [2, 3, 12], что объясняется давностью возделывания сорта (с 1975 г.) и соответствующей приспособляемостью популяций патогена [2, 6].

У растений образца риса конкурсного сортоиспытания 403-16 идентифицирован аллель устойчивости гена *Pi-2* в полиморфном состоянии – 12 % растений имели аллель восприимчивости. Наиболее урожайный 103/5-2-10 моно-



Изменчивость устойчивости образцов конкурсного сортоиспытания и сортов риса *Oryza sativa* L. (2019–2021 гг.): —●— Приморский 29; -■- 403-16; ····- 130-9-10; -◇- 103/5-2-10; -×- 408-15; -◆- Дальневосточный; -▲- Долинный; —+— Алмаз.

морфен по этому аллелю. Образец 130-9-10 полиморфен по двум генам устойчивости: 80 % растений обладали аллелем устойчивости по *Pi-2* и 20 % по *Pi-ta²*. В образце 408-15 подтверждены только аллели восприимчивости к пирикулярриозу шести генов (табл. 2). Все четыре образца одинаково поражались местными штаммами *P. oryzae* (см. табл. 1). Их гибридогенное происхождение объясняет полиморфизм по изученным генам. Семеноводство таких сортов без молекулярно-генетического сопровождения вероятнее всего приведет к полной утрате аллелей устойчивости. Можно предположить наличие каких-либо генов устойчивости в дальневосточных районированных сортах риса Приозерный 61, Дарий 23 и Дальневосточный в период их Госсортоиспытания. Сейчас в них никаких аллелей устойчивости не обнаруживается [11]. Поскольку, перечисленные сорта также получены методом гибридизации, они могли со временем потерять первоначальную толерантность вместе с полиморфными генами устойчивости. Таким образом, нарастающая восприимчивость районированных сортов риса может быть следствием взаимобратных изменений в популяциях растений и штаммов патогена: первые теряют аллели устойчивости, вторые приобретают гены авирулентности.

Эффективным для обеспечения резистентности сортов риса в Приморском крае считается ген *Pi-ta²* [9, 10].

Табл. 2. Наличие генов устойчивости к пирикулярриозу в образцах риса *Oryza sativa* L. конкурсного сортоиспытания

Образец	Ген устойчивости риса к пирикулярриозу					
	<i>Pi-1</i>	<i>Pi-2</i>	<i>Pi-z(t)</i>	<i>Pi-b</i>	<i>Pi-ta²</i>	<i>Pi-9</i>
403-16	–	+ / – *	–	–	–	–
130-9-10	–	+ / – *	–	–	+ / – *	–
103/5-2-10	–	+	–	–	–	–
408-15	–	–	–	–	–	–

* образец полиморфен по гену

В образце 130-9-10 аллелем устойчивости этого гена обладают лишь 20 % растений, чего явно недостаточно для позитивного результата. Аллели устойчивости гена *Pi-2* обнаружены у образцов 403-16, 130-9-10, 103/5-2-10 и сорта Приморский 29 (см. табл. 2). Их наличие в полиморфном или мономорфном состоянии равнозначно аллелю восприимчивости этого гена. Во всех случаях $I_r=10,0 \dots 11,9$, что характерно чувствительным сортам риса (см. табл. 1). Однако ген широкого спектра действия *Pi-2* способен давать трансгрессивный гетерозис по устойчивости к метельчатой форме пирикулярриоза в сочетании с некоторыми другими генами семейства *Pi* [18]. Таким образом, для повышения резистентности урожайному образцу конкурсного сортоиспытания 103/5-2-10 необходима интрогрессия дополнительно аллелей устойчивости одного-двух генов с молекулярно-генетическим контролем их гомозиготного состояния.

Ген *Pi-2* имеет минимум пять аллелей (223, 227, 239, 243 и 245 п.н.), и только один из них (239 п.н.) считается аллелем устойчивости к пирикулярриозу [19]. В качестве контроля в ПЦР-анализе мы использовали сорт риса Магнат ростовской селекции, обладающий этим аллелем [20]. В эксперименте по подбору эффективных для дальневосточного рисоводства генов устойчивости к *P. oryzae Pi-2* не участвовал из-за отсутствия соответствующей моногенной линии в коллекции центра [9, 10]. Ген широкого спектра действия *Pi-9* рассматривается китайскими учеными как аллель гена *Pi-2* [21]. В условиях Приморского края *Pi-9* дает весьма положительный эффект [9, 10], и, к сожалению, не обнаруживается в сортах риса [11]. Таким образом, полученные результаты укладываются в концепцию пангенома со значительными вариациями функционального набора генов, отвечающих за агрономически важные признаки [22, 23]. Наличие большого числа генов устойчивости к пирикулярриозу у вида *O. sativa* [4, 7] свидетельствует об их локусах в вариабельной части за пределами пангенома. Любой из генов способен формировать множество аллелей отличных от референсных значений генома. Исходя из этого, для дальневосточной селекции аллелем устойчивости гена *Pi-2* может оказаться любой другой выявленный аллель или даже образован новый, уникальный для региона.

В целом пирамидирование генов – наиболее результативный метод создания резистентных к пирикулярриозу сортов риса [8, 18, 24]. Перспективы дальневосточной селекции на устойчивость к патогену *P. oryzae* связаны в первую очередь с удвоенными гаплоидами, несущими в генопите два-три гена семейства *Pi* в гомозиготном состоянии [25].

Таким образом, по результатам трехлетних исследований в конкурсном сортоиспытании выделился образец риса 103/5-2-10 с урожайностью 35,7 ц/га, что выше стандарта на 6,0 ц/га. Сорта Алмаз и Долинный демонстрируют стабильно среднеустойчивый тип реакции к

различным наборам штаммов *P. oryzae*, циркулирующим на территории Приморского края. Наличие аллеля устойчивости гена *Pi-2* не дает преимуществ в иммуности сортам риса дальневосточной селекции.

Литература.

1. Чайка А. К., Ващенко А.П. *Аграрная наука в Приморье (XX-XXI вв.)*. Владивосток: Рея, 2017. 228 с.
2. Ковалевская В.А., Лелявская В.Н., Ковалева А.А. Устойчивость риса к пирикулярриозу в Приморском крае // *Защита и карантин растений*. 2013. № 5. С. 24–26.
3. Клименкова Т.Г., Михайлик Т.А., Лелявская В.Н. Оценка сортообразцов риса на устойчивость к пирикулярриозу // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2018. № 4(48). С. 67–74. doi: 10.24411/1999-6837-2018-14082.
4. Identification of three major R genes responsible for broad-spectrum blast resistance in an indica rice accession / W. Xiao, Q. Yang, D. Sun, et al. // *Mol. Breeding*. 2015. Vol. 35. doi: 10.1007/s11032-015-0226-4
5. Molecular screening of blast resistance genes in rice germplasm resistant to *Magnaporthe oryzae* / Y. Liang, B. Yan, Y. Peng, et al. // *Rice Science*. 2017. Vol. 24(1). P. 41–47. doi: 10.1016/j.rsci.2016.07.004.
6. The top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology / R. Dean, L.V. Kan, Z.A. Preporius, et al. // *Mol. Plant Pathology*. 2012. Vol. 13. No. 4. P. 414–430. doi: 10.1111/J.1364-3703.2011.00783.X.
7. A review of microsatellite markers and their application in rice breeding programs to improve blast disease resistance / G. Miah, M.Y. Rafii, M.R. Ismail, et al. // *Int. J. Mol. Sci.* 2013. Vol. 14. No. 11. P. 22490–22528. doi: 10.3390/ijms141122499.
8. Development of blast-resistant rice varieties based on application of DNA technologies / E.V. Dubina, P.I. Kostylev, S.V. Garkusha, et al. // *Euphytica*. 2020. Vol. 216. Article 162. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s2284-019-0264-3> (дата обращения: 18.12.2021). doi: 10.1007/s10681-020-02698-4.
9. Ковалева А.А., Лелявская В.Н., Лукьянович Т.И. Эффективные гены устойчивости к пирикулярриозу риса в Приморском крае // *Современные иммунологические исследования, их роль в создании новых сортов и интенсификации растениеводства. Матер. Всерос. научн. произв. конф., Большие Вязьмы, 18 ноября, 2009 г. – Большие Вязьмы, 2009. С. 127–132.*
10. Санкин А.Ю., Лелявская В.Н., ИТаль Сун. Актуальные в селекционном процессе гены устойчивости к пирикулярриозу риса в условиях Приморского края // *Успехи современной науки*. 2017. Т. 2. № 10. С. 26–28.
11. Илюшко М.В., Ромашова М.В., Гученко С.С. Молекулярное маркирование генов устойчивости к пирикулярриозу в сортах риса дальневосточной селекции // *Аграрная Россия*. 2020. № 10. С. 30–33. doi: 10.30906/1999-5636-2020-10-30-33.
12. Гученко С.С., Суницкая Т.В., Лелявская В.Н. Селекция дальневосточных сортообразцов риса на устойчивость к пирикулярриозу // *Рисоводство*. 2019. № 1(42). С. 47–49.
13. Сметанин А.П., Анрод В.А., Дзюба А.П. *Методика опытных работ по селекции, семеноводству, семеноведению и контроль за качеством семян риса*. Краснодар: ВНИИ риса, 1972. 156 с.
14. Yamada M., Kiosava S. Proposal of new method for differentiating races of *Piricularia oryzae* Cav. in Japan // *Ann. Phytopathol. Soc. Japan*. 1976. Vol. 42. P. 216–219.
15. Коваленко Е.Д., Горбунова Ю.В., Ковалева А.А. Методические указания по оценке устойчивости сортов риса к возбудителю пирикулярриоза. Москва: ВНИИФ, 1988. 30 с.
16. Идентификация генов устойчивости к пирикулярриозу в сортах риса дальневосточной селекции с использованием ДНК-маркеров / М.В. Илюшко, П.В. Фисенко, Т.В. Суницкая и др. // *Зерновое хозяйство России*. 2017. № 4(52). С. 41–11.
17. Wang J.C., Correll J.C., Jia Y. Characterization of rice blast resistance genes in rice germplasm with monogenic lines and pathogenicity assays / *Crop Protection*. 2015. V. 72. P. 132–138. doi: 10.1016/j.cropro.2015.03.014.
18. Comprehensive evaluation of resistance effects of pyramiding lines with different broad-spectrum resistance genes against *Magnaporthe oryzae* in rice (*Oryza sativa* L.) / Y. Wu, N. Xiao, Y. Chen, et al. // *Rice*. 2019. Vol. 12. Article 11. URL: (дата обращения: 18.12.2021). doi: 10.1186/s12284-019-0264-3.
19. Технология массового скрининга риса на наличие генов устойчивости к пирикулярриозу *Pi-1*, *Pi-2* и *Pi-33* на основе мультиплексного микросателлитного анализа / И.А. Шилов, Ю.В. Анискина, Н.С. Велишаева и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2018. Т. 32. № 11. С. 21–25. doi: 10.24411/0235-2451-2018-11105.
20. Сорт риса Магнат, созданный с помощью биотехнологий / П.И. Костылев, Е.В. Краснова, А.А. Редькин и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2015. Т. 29. № 3. С. 10–12.
21. Marker-assisted selection for rice blast resistance genes *Pi2* and *Pi9* through high-resolution melting of a gene-targeted amplicon / W. Luo, M. Huang, T. Guo, et al. // *Plant Breeding*. 2017. Vol. 136. P. 67–73. doi: 10.1111/pbr.12447.
22. Pronozin A.Y., Bragina M. K., Salina E.A. Crop pangenomes // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021. Т. 25. № 1. С. 57–63. doi: 10.18699/VJ21.007.
23. Pangenomics in crop improvement – from coding structural variation to finding regulatory variants with pangenome graphs / S.F. Zanini, P.E. Bayer, R. Well, et al. // *Plant genome*. 2021. Special Issue. Article: e20177. URL: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tpg2.20177> (дата обращения: 18.12.2021). doi: 10.1002/tpg2.20177.
24. Development of new rice (*Oryza sativa* L.) breeding lines through marker-assisted introgression and pyramiding of brown planthopper, blast, bacterial leaf blight resistance, and aroma genes / X. Wang, X. Guo, X. Ma, et al. // *Agromony*. 2021. Vol. 11. Article 2525. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/12/2525> (дата обращения: 18.12.2021). doi: 10.3390/agronomy11122525.
25. Оценка продуктивности удвоенных гаплоидов риса, отобранных в ходе маркер-ориентированной селекции на устойчивость к пирикулярриозу / К.С. Мельничук, С.С. Гученко, М.В. Ромашова и др. // *Рисоводство*. 2021. № 2(51). С. 6–11. doi: 10.33775/1684-2464-2021-5-2-6-11.

Поступила в редакцию 29.11.2021
После доработки 27.12.2021
Принята к публикации 25.01.2022

АНАЛИЗ И КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В АДАПТИВНОЙ СЕЛЕКЦИИ ЯРОВЫХ ЗЕРНОВЫХ

А.И. Кинчаров, кандидат сельскохозяйственных наук,
Е.А. Дёмина, кандидат сельскохозяйственных наук

Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Поволжский научно-исследовательский институт
селекции и семеноводства им. П.Н. Константинова,
446442, Самарская обл., п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Шоссейная, 76
E-mail: kincharov_ai@mail.ru

Глобальное потепление климата привело к увеличению частоты проявлений экстремальных погодных аномалий – высоких температур, засух и ливней. Прогнозируемое повышение температуры на 1,5°C к 2050 г. свидетельствует о возможности дальнейших негативных изменений, которые затронут агропромышленный сектор. В ответ на климатические вызовы необходимо снижение зависимости растениеводства от меняющихся погодных условий и стабильное увеличение урожайности в будущем. Цель исследований – анализ текущего состояния и прогноз климатических изменений в регионе для коррекции подходов к адаптивной селекции и обеспечения устойчивости яровых зерновых к изменениям климата. Объект исследований – метеоусловия за 1990–2020 гг., фенологические наблюдения и урожайные данные конкурсного испытания пшеницы яровой и сорта «долгожителя» Кинельская 59. Метеоусловия за вегетацию культуры в регионе претерпели существенные изменения: среднесуточная температура воздуха в среднем за 2010–2020 гг. возросла на 2,11°C с прогнозом на 2021–2030 гг. до 3,00°C, сумма осадков снизилась соответственно на 23,94 мм и 49,80 мм к среднемноголетней норме. Это повлияло на продолжительность вегетации культуры: средние сроки сева по десятилетиям практически не изменились, но при этом сроки уборки урожая сократились на 8 суток. Увеличение вариабельности урожайности свидетельствует о том, что нынешние программы и методы селекции недостаточно подготавливают пшеницу к климатической неопределенности и изменчивости. С учетом анализа предстоящих климатических изменений считаем, что необходимо особое внимание уделить в первую очередь анализу разнообразия откликов сортов коллекционного материала на меняющиеся условия и выделять для скрещиваний формы с минимальной реакцией на неблагоприятные факторы среды в условиях более жарких и засушливых лет.

ANALYSIS AND SHORT-TERM FORECAST OF CHANGES IN CLIMATIC CONDITIONS IN THE ADAPTIVE BREEDING OF SPRING CEREALS

Kincharov A.I., Demina E.A.

Samara Federal Research Scientific Center of RAS, Volga Scientific Research Institute of Selection
and Seed-Growing named after P.N. Konstantinov,
446442, Samarskaya obl., p.g.t. Ust-Kinelskiy, ul. Shosseynaya, 76
E-mail: kincharov_ai@mail.ru

Global climate warming has led to an increase in the frequency of extreme weather anomalies – heat waves, droughts and downpours. The projected temperature increase of 1.5°C by 2050 indicates further negative changes that will affect the agro-industrial sector. In response to climate challenges, it is necessary to solve the problems of reducing the dependence of crop production on changing weather conditions and a stable increase in yields in the future. The purpose of the research is to analyze the current state and forecast of climate change in the region to correct the strategy of adaptive breeding and ensure the stability of spring cereals to climate change. The objects of research are weather conditions for 1990–2020, phenological observations and yield data of competitive testing of spring wheat and «long-lived» Kinelskaya 59 varieties. Weather data is analyzed using the capabilities of Microsoft Excel 2007. The analysis of weather conditions during the growing season of the crop in the region indicates significant changes: the average daily air temperature is plus 2.11°C on average for 2010–2020 and the forecast is plus 3.00°C for 2021–2030, according to the amount of precipitation, respectively, minus 23.94 mm and the forecast is minus 49.80 mm to the average annual norm. Weather conditions affected the duration of the growing season of the crop: the average sowing time for decades has practically not changed, but at the same time the maturation and harvesting periods have been reduced by eight days. The increase in yield variability in the world indicates that current breeding programs and breeding methods do not sufficiently prepare wheat for climatic uncertainty and variability. Taking into account the analysis of upcoming climate changes, we believe that special attention should be paid primarily to the analysis of the diversity of responses of varieties of collection material to changing conditions and to allocate forms for crosses with minimal reaction to adverse environmental factors in hotter and drier years.

Ключевые слова: глобальное потепление, температура воздуха, осадки, пшеница яровая (*Triticum aestivum* L.), устойчивость, адаптивность, продуктивность.

Key words: global warming, air temperature, precipitation, spring wheat (*Triticum aestivum* L.), stability, adaptability, productivity.

Селекционная работа, в историческом плане, началась с того, что из года в год, отбирая более продуктивные соцветия с целью получения семян для посева, люди улучшали различные популяции культурных растений для возделывания в местных климатических условиях, ускоряя тем самым длительный естественный отбор, описываемый Чарльзом Дарвином. Таким образом, благодаря человеку и различным погодным условиям в течение продолжитель-

ного времени, происходило конкурентное выживание и преимущественное размножение определенных особей [1], форм и популяций. Со временем у них вырабатывалась приспособленность [2], адаптация к определенным условиям, складывающимся в конкретной местности. Образовавшиеся таким образом формы, в основном – популяции, имели хорошую и стабильную продуктивность по годам. С развитием научной селекции и современных познаний в

генетике, физиологии, биохимии, иммунологии, экологии и других смежных науках, создание сортов обрело более сложные очертания и ускоренные темпы улучшения культур в требуемом для человечества направлении. Однако, несмотря на то, что современный инструментарий геномной селекции позволяет сократить продолжительность селекционного процесса, в засушливых условиях при невысоком коэффициенте размножения семян, сроки создания и коммерциализации сортов превышают 10...15 лет. Таким образом, сегодня подбор исходного материала и скрещивания проводятся для получения сортов, которые будут возделываться в производстве в 2030-х гг. Поэтому в условиях глобального потепления климата, в первую очередь надо обратить внимание на характер и скорость изменения погодно-климатических факторов. Как отмечают J. Hansen et al. [3] частота проявлений чрезвычайно жаркой погоды, по сравнению с десятилетиями до 1980 г., увеличилась приблизительно в 50 раз. Если тогда, чрезвычайная летняя жара, как правило, затрагивала 0,1...0,2% поверхности планеты, сегодня около 10%. Глобальное потепление приводит к увеличению частоты экстремальных погодных явлений, включая волны жары, засух и ливней [4], а также пожаров и наводнений [5]. Многие исследователи на фоне этих изменений отмечают увеличение вариабельности урожайности сельскохозяйственных культур. D.K. Ray et al. [6] приводят данные, что за последние 20 лет в Западной Европе, в Соединенном Королевстве, Франции, Германии, Испании и Италии, изменчивость климата объясняет ~31...51% вариабельности урожайности пшеницы, в Восточной Европе, Украине, Российской Федерации и Казахстане – 23...66% вариабельности. Усредненная по всему миру изменчивость климата объясняла ~35% вариабельности урожайности пшеницы [6]. За 1990–2007 гг. валовое производство зерна пшеницы в России составило в среднем 38,8 млн.т (по годам $\pm 30,4\%$), при средней урожайности 1,54 т/га ($\pm 33,1\%$). Еще более высокая зависимость от погодных условий отмечается в Самарской области, где за анализируемый период валовое производство зерна варьировало от 647,5 тыс. до 2 748,4 тыс.т ($\pm 61,9\%$), в том числе яровой пшеницы – от 162,0 тыс. до 690,9 тыс.т ($\pm 62,0\%$), при средней урожайности по годам от 0,59 до 1,82 т/га.

Учитывая все негативные аспекты и то, что большая часть посевных площадей сельскохозяйственных культур в Российской Федерации находится в континентальной зоне рискованного земледелия, в частности засушливого климата, зависимость растениеводства от агрометеорологических условий остается очень высокой. Поэтому многие исследователи уделяют особое внимание вопросам стабильности урожая [7, 8], адаптивности [9, 10] и устойчивости сортов к абиотическим стрессам [11, 12, 13]. Однако современные вызовы глобального потепления климата, особенно сильно проявившиеся в последнее десятилетие [14], требуют от мировой аграрной науки больших усилий по снижению зависимости отрасли от экстремальных погодных явлений [15], существенно выходящих за пределы среднемноголетних наблюдений, для обеспечения продовольственной безопасности [16]. Следует отметить, что агроклиматические зоны Российской Федерации, с учетом больших территориальных масштабов, имеют свои характерные неблагоприятные абиотические факторы среды, проявляющиеся в течение вегетации сельскохозяйственных культур. В условиях Поволжья, Оренбуржья, ряда регионов Сибири, а также Казахстана, негативное влияние на рост и развитие растений оказывают в основном следующие факторы:

низкая влагообеспеченность почвы, связанная с её малыми запасами весной и дефицитом осадков в период вегетации;

длительный повышенный температурный фон, превосходящий среднемноголетнюю норму за продолжительный период;

различные виды засух и суховеев, проявляющиеся с момента появления всходов и до уборки культур.

Дальнейшее потепление климата на земле, по данным различных исследователей, продлится, как минимум, до конца текущего столетия. При этом в Парижском соглашении по климату ставилась задача снижения темпов потепления климата не выше $1,5^{\circ}\text{C}$ к 2050 г. и не более $2,0^{\circ}\text{C}$ – к 2100 г. Однако в Шестом докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата от 07 августа 2021 г. отмечается, что порог превышения в $1,5^{\circ}\text{C}$ будет достигнут уже к 2040 г. [5]. С учетом того, что среднегодовая температура в России растет быстрее общемировой более чем в 2,5 раза [17], необходим анализ изменения погодно-климатических условий в разрезе регионов страны. Прогнозирование климата в краткосрочной перспективе (от года до десятилетия), дает возможность адаптироваться и обеспечить устойчивость к изменениям климата [18].

В связи с этим, в работе поставлена цель – провести анализ изменения погодно-климатических условий вегетационного периода места проведения исследований в разрезе десятилетий за 31-летний период, выявить их влияние на рост и развитие яровой мягкой пшеницы, определить тренд и скорость агроклиматических изменений в регионе на короткую перспективу. Актуальность таких исследований обусловлена тем, что, несмотря на высокий адаптационный потенциал многих культурных растений, в условиях резкого изменения погодно-климатических условий он может оказаться недостаточным, и, скорее всего, потребуются корректировка некоторых аспектов стратегии адаптивной селекции в регионе.

Методика. В работе использовали массив данных с 1990 по 2020 гг. Характеристика метеоусловий места проведения исследований представлена по данным метеопоста Усть-Кинельский Самарского ГАУ, использовали такие показатели, как среднесуточная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$), сумма осадков (мм) за сутки с 01 мая по 31 августа, по которым рассчитывали среднюю температуру воздуха и сумму осадков за месяц. Гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК) рассчитан по формуле: $\text{ГТК} = R \cdot 10 / \Sigma t$, где R – сумма осадков за период с температурами выше $+10^{\circ}\text{C}$ (мм), Σt – сумма температур за то же время ($^{\circ}\text{C}$). Для большей информативности и наглядности анализируемый срок исследований разбит на три периода: 1990–1999 гг.; 2000–2009 гг. – по 10 лет и 2010–2020 гг. – 11 лет. С учетом работы с большими объемами данных полученные результаты представлены в виде аналитических таблиц, где за каждый период приведены минимальные и максимальные отклонения величин показателей от среднемноголетнего значения, среднее отклонение в год (отношение суммарного отклонения за период на количество лет) и соотношение количества лет с отрицательными и положительными отклонениями. Конкурсное сортоиспытание яровой мягкой пшеницы в объеме 36...60 образцов ежегодно закладывали в селекционном севообороте на делянках с учетной площадью 25 м^2 по методике Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур [19] в четырехкратной повторности, с выполнением наблюдений за прохождением фенологических фаз развития растений, развитием болезней и вредителей. Почва опытного участка – чернозем типичный среднемощный легкоглинистый, содержание гумуса в слое 0...15 см (по И.В. Тюрину, ГОСТ 2613-91) в пределах 5...6 %, легкогидролизуемого азота – 28...49 мг/кг почвы, подвижного фосфора – 61...77 мг/кг

Табл. 1. Анализ среднесуточной температуры воздуха за 31-летний период (по данным метеопоста Усть-Кинельский, 1990–2020 гг.)

Показатель	Отклонение среднесуточной температуры воздуха от среднегодовой нормы (°С)				
	май (14,1*)	июнь (18,7)	июль (20,7)	август (18,9)	май–август (18,1)
1990–1999 гг.					
Интервал отклонений, °С	-3,0...+4,0	-1,7...+4,8	-3,0...+2,9	-1,9...+0,3	-1,5...+2,4
Среднее отклонение в год, °С	+0,55	+1,44	+0,17	-0,85	+0,33
Количество лет с отрицательными / положительными отклонениями**	5/5	4/6	5/5	8/2	5/5
2000–2009 гг.					
Интервал отклонений, °С	-3,9...+4,1	-4,1...+3,7	-2,0...+2,6	-2,0...+4,1	-0,9...+1,4
Среднее отклонение в год, °С	+0,58	+0,15	+0,77	+0,79	+0,57
Количество лет с отрицательными / положительными отклонениями**	2/8	5/5	2/8	3/7	2/8
Период 2010–2020 гг.					
Интервал отклонений, °С	-0,3...+4,4	-2,2...+4,6	-0,6...+6,2	-0,9...+5,9	+0,1...+5,1
Среднее отклонение в год, °С	+2,61	+1,36	+2,21	+2,15	+2,11
Количество лет с отрицательными / положительными отклонениями**	1/10	4/7	3/8	2/9	0/11

*среднегодовая норма за соответствующий период;
 **в числителе количество лет за десятилетие с отрицательными отклонениями средней температуры от среднегодовой нормы, в знаменателе – с положительными

(ГОСТ 26204-91), обменного калия – 374...423 мг/кг (ГОСТ 26210-91), рН солевой вытяжки – 5,4 ед. (ГОСТ 26483-85).

Уборку осуществляли селекционными комбайнами Sampo 130, массу зерна с делянки приводили к стандартной влажности 14% с пересчетом на урожайность в ц/га.

Математическую обработку урожайных данных конкурсного сортоиспытания выполняли с использованием пакета селекционно-ориентированных программ Agros 2.11 [20], STATISTICA, с расчетом наименьшей существенной разницы на 95% уровне значимости. Графики, расчеты и уравнения линейного, полиномиального трендов подготовлены при помощи пакета Анализ данных Microsoft Excel 2007, с расчетом коэффициента аппроксимации (R²), который показывает уровень соответствия линии тренда фактическим данным.

Результаты и обсуждение. Анализ погодных условий по десятилетиям, в сравнении со среднегодовыми значениями, сложившимися к 1990 г., свидетельствует о наличии значительных изменений условий вегетации яровой мягкой пшеницы за эти годы относительно среднегодовой нормы (табл. 1). Результаты ретроспективного анализа свидетельствуют о том, что первый месяц вегетации культуры (май) в 90-х гг. XX-го столетия характеризуется практически равными значениями отрицательных и положительных отклонений среднесуточной температуры воздуха от среднегодового значения (14,1°С), которые по годам составляли от -3,0 до +4,0 °С. Среднее отклонение в год за период составило +0,55 °С (суммарное за 10 лет +5,5 °С). При этом количество лет с отрицательными и положительными отклонениями за десятилетие были равны – пять на пять (5/5).

Аналогичную картину наблюдали в июле и в среднем за вегетационный период (май–август). В качестве исключения можно выделить август, в котором большинство лет за десятилетие было несколько более прохладным по сред-

несуточной температуре относительно среднегодовых значений – восемь прохладных лет из десяти (8/2).

В последующие 10 лет (2000–2009 гг.) наблюдается незначительное увеличение температурного фона за условную вегетацию в целом (в среднем на +0,57 °С в год) и некоторое снижение амплитуды отклонений от среднегодовых значений по годам от -0,9 до +1,4 °С.

При этом отмечается значительное снижение количества лет с отрицательными отклонениями – с пяти лет в предыдущем десятилетии, до двух – в анализируемом периоде: 20% прохладных лет и 80% более теплых и жарких. Следует особо отметить резкое, по сравнению с предыдущим десятилетием, изменение температурных условий августа месяца – три года с отрицательными отклонениями, против восьми в предыдущем десятилетии. В последний раз значительное отклонение температуры воздуха в отрицательную сторону отмечено в августе 2002 г. – минус 2,0 °С к норме, до 16,9 °С.

Третий анализируемый период (2010–2020 гг.) стал намного теплее и жарче предшествующих двух десятилетий. Отрицательные отклонения среднесуточной температуры мая, июля и августа в эти годы не превышали 1°С, исключение – июль 2017 г. (16,5°С) – минус 2,2° к норме. При этом положительные отклонения по всем месяцам достигали 4,4...6,2°С и в целом за вегетацию – плюс 5,1°С. Отклонение среднесуточной температуры воздуха от среднегодовых значений по всем месяцам 11-летнего периода, в годовом выражении, достигло рекордных положительных значений в пределах 1,36...2,61°С, а за условную вегетацию яровых зерновых – 2,11°С, тогда как в предыдущем десятилетии эти величины были почти в 4 раза ниже. Анализируя в целом вегетационный период (май–август), необходимо отметить, что за последние 11 лет во все годы отмечали только положительные отклонения среднесуточной температуры воздуха относительно среднегодовой нормы.

Табл. 2. Анализ количества осадков в месяц за 31-летний период (по данным метеопоста Усть-Кинельский), мм

Показатель	Отклонение суммы осадков от среднегодовой нормы за период				
	май (33*)	июнь (39)	июль (47)	август (44)	май–август (163)
1990–1999 гг.					
Интервал отклонений, мм	-23,5...+100,5	-36,9...+68,0	-39,8...+50,7	-43,5...+51,4	-74,3...+162,0
Сумма отклонений за период, мм/год	+14,30	+7,55	+5,71	+0,49	+16,63
Количество лет с отрицательными / положительными отклонениями**	3/7	5/5	7/3	6/4	6/4
2000–2009 гг.					
Интервал отклонений, мм	-17,8...+18,0	-21,4...+43,1	-34,1...+108,9	-37,7...+62,3	-72,3...+106,0
Сумма отклонений за период, мм/год	-2,15	+14,60	+11,63	-10,13	+13,95
Количество лет с отрицательными / положительными отклонениями **	7/3	3/7	5/5	7/3	3/7
2010–2020 гг.					
Интервал отклонений, мм	-26,9...+37,4	-38,5...+90,8	-45,3...+34,4	-42,7...+63,5	-105,3...+60,9
Сумма отклонений за период, мм/год	-2,59	+2,12	-14,15	-9,31	-23,94
Количество лет с отрицательными / положительными отклонениями **	7/4	6/5	8/3	8/3	8/3
*среднегодовая норма за соответствующий период;					
**в числителе количество лет за десятилетие с отрицательными отклонениями суммы осадков от среднегодовой нормы, в знаменателе – с положительными отклонениями					

За годы исследований вегетационный период с отрицательным отклонением от среднегодовых значений (то есть ниже 18,1°C) среднесуточной температуры воздуха в последний раз в регионе наблюдали в 2003 г. (-0,3°C к норме) и в 2002 г. (-0,9°C), то есть более 17 лет назад. В 2021 г. среднесуточная температура воздуха за май составила 20,8°C (+6,7 к среднегодовой норме), за июнь – 22,9°C (+4,2), за июль – 23,5°C (+2,8), за август – 24,7°C (+5,8), что вызывает определенную обеспокоенность складывающейся ситуацией.

Анализ вегетационных периодов (май–август) трех десятилетий свидетельствует о значительных изменениях температурного фона за столь короткий срок: в первый анализируемый период (1990–1999 гг.) условия вегетации растений оказались теплее в среднем на +0,33 °C. При этом в половине лет (1990, 1992, 1993, 1994, 1999 гг.) температурный режим был относительно более прохладным (менее 18,1 °C), что вполне приемлемо для условий континентального климата Самарской области и Средневожжского региона; во втором периоде (2000–2009 гг.) условия вегетации в среднем теплее уже на +0,57°C, но при этом количество прохладных лет существенно меньше – два года (2002 и 2003 гг.); третий период (2010–2020 гг.) существенно отличается от предыдущих десятилетий тем, что по условиям вегетации яровых зерновых он оказался намного теплее предыдущих – в среднем на +2,11°C. Данное отклонение в 6,4 раза выше, чем в первом периоде, и при этом не отмечено ни одного года с температурным фоном ниже климатической нормы (среднегодовых значений).

Повышение температуры воздуха, теоретически увеличивает испарение влаги с водной поверхности, почвы и других объектов, и соответственно стоит ожидать увеличения количества осадков. Анализ количества вы-

павших осадков по месяцам и в целом за вегетационный период (май–август) трех десятилетий свидетельствует о том, что в первый период (1990–1999 гг.) за все месяцы в среднем происходило увеличение количества выпавших осадков по месяцам от +0,49 мм до +14,30 мм (табл. 2). В целом за вегетацию – +16,63 мм, при разбросе по годам: от недобора осадков -74,3 мм (1998 г.) до значительного их увеличения +162,0 мм (1990 г.), которое практически равнялось среднегодовым значениям (163 мм), то есть в 1990 г. за май–август выпала почти двойная норма осадков равная 325 мм.

Во втором десятилетии (2000–2009 гг.) на фоне дальнейшего повышения среднесуточной температуры воздуха за май–август, по сравнению с предыдущим периодом, отмечали небольшой недобор осадков в течение двух месяцев – май (-2,15 мм/год) и август (-10,13 мм/год). Но при этом условно каждая вегетация растений яровой пшеницы в этот период проходила при незначительном превышении осадков, а в среднем за вегетацию выпадало на 13,95 мм осадков больше нормы.

Третий изучаемый период (2010–2020 гг.) особо выделился недобором осадков практически по всем исследуемым месяцам. При этом отмечен значительный дефицит осадков в июле -14,15 мм (суммарно за 11 лет 155,7) и августе -9,31 мм (суммарно – 102,4 мм). Средние отклонения за год в мае (-2,59 мм) и июне (-2,21 мм) были значительно меньше. И это в условиях сильного повышения температурного фона. Необходимо отметить, что среднее увеличение за последний период среднесуточной температуры воздуха за май–август на +2,11°C (к среднегодовой норме), скорее всего, привело и к определенному дефициту осадков за условную вегетацию -23,94 мм (суммарный недобор осадков за 11 лет составил 263,3 мм).

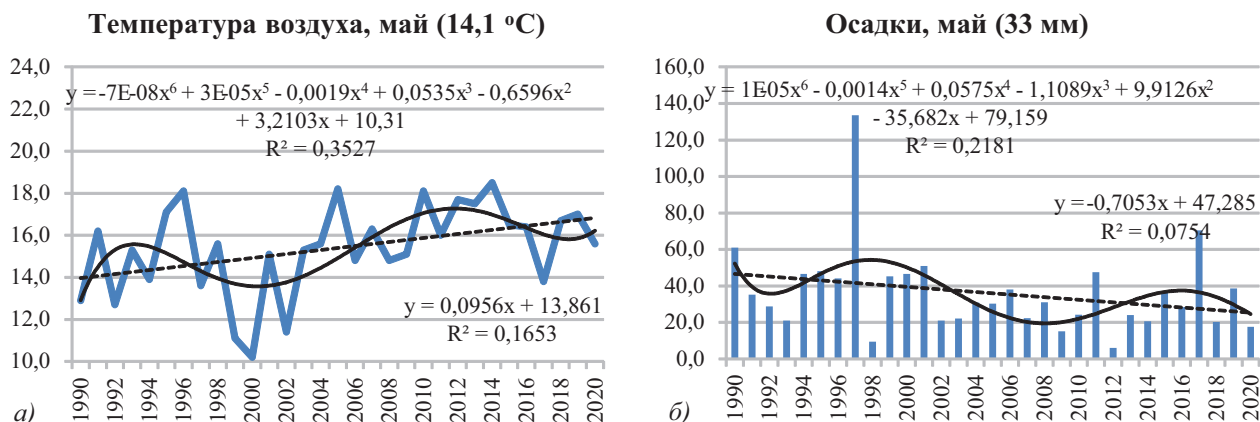


Рис. 1. График изменения среднесуточной температуры воздуха и суммы осадков за май с 1990 по 2020 г.: а) — температура; ———— — линейная (температура); ———— — полиномиальная (температура); б) — осадки; ———— — линейная (осадки); ———— — полиномиальная (осадки).

Таким образом, необходимо отметить снижение суммарного количества осадков за вегетацию яровых зерновых культур (май–август) в течение исследуемого тридцатидвухлетнего периода. Если в первом десятилетии на фоне незначительного повышения температуры воздуха, максимальное превышение количества осадков за вегетацию над среднегодовыми нормами в благоприятном 1990 г. составило 162 мм (99,4%), во втором (2006 г.) – 106,0 мм (65,0%), а в третьем (2017 г.) – всего 60,9 мм (37,4%). Следовательно, благоприятные по осадкам мая и летних месяцев годы суммарно потеряли за 31 год более 100 мм осадков за условную вегетацию ранних зерновых культур.

В контексте исследований важно выявить интенсивность изменения погодных условий за анализируемый период и рассчитать возможные последствия глобального потепления для региона на ближайшее десятилетие. На графиках изменения среднесуточной температуры воздуха отчетливо виден восходящий линейный тренд изменения средней температуры воздуха за период исследований и нисходящий – по сумме осадков за май месяц (рис. 1).

Уровень достоверности – аппроксимация (R^2) по линейному тренду – довольно низкий для обоих показателей, поэтому фактические данные дополнительно описаны полиномом в шестой степени, где величина достоверности по температуре воздуха находится на уровне средних значений ($R^2=0,352$), а по сумме осадков за май чуть ниже

средней ($R^2=0,218$).

Согласно полиномиальному графику формируется волнообразный восходящий тренд на увеличение среднесуточной температуры воздуха в мае. Для определения прогноза изменения суточной температуры воздуха в среднем к маю 2030 г. можно использовать уравнение линейной регрессии:

$$Y_t = 0,095x + 13,86 = 0,095 \cdot (31+10) + 13,86 = 17,16 \text{ (}^\circ\text{C)},$$

где x – количество лет анализируемого периода (31 год с 1990 по 2020 гг., 10 – прогноз до 2030 г.).

Необходимо отметить, что в начале исследуемого периода (1990 г.), по расчетным данным, среднесуточная температура воздуха составляла $Y = 0,095 \cdot 1 + 13,86 = 14,0$ ($^\circ\text{C}$), фактическое значение – 12,9 $^\circ\text{C}$, а в среднем за 5 лет (1990–1994 гг.) по расчетным данным – 14,15 $^\circ\text{C}$, по фактическим – 14,20, что свидетельствует о высокой точности расчетных данных в среднем за 5 лет.

Количество осадков в мае к 2030 г. в среднем по прогнозу составит:

$$Y_{pr} = -0,705x + 47,28 = -0,705 \cdot (31+10) + 47,28 = 18,4 \text{ (мм)},$$

что на 14,6 мм ниже многолетних значений (то есть 55,8% от нормы).

За годы исследований оптимальные сроки сева яровой пшеницы на опытном поле практически не изменились – в среднем по десятилетиям 7–8 мая, а максимально поздние по годам из-за осадков отмечали 21 мая в 1990–1999 гг. и

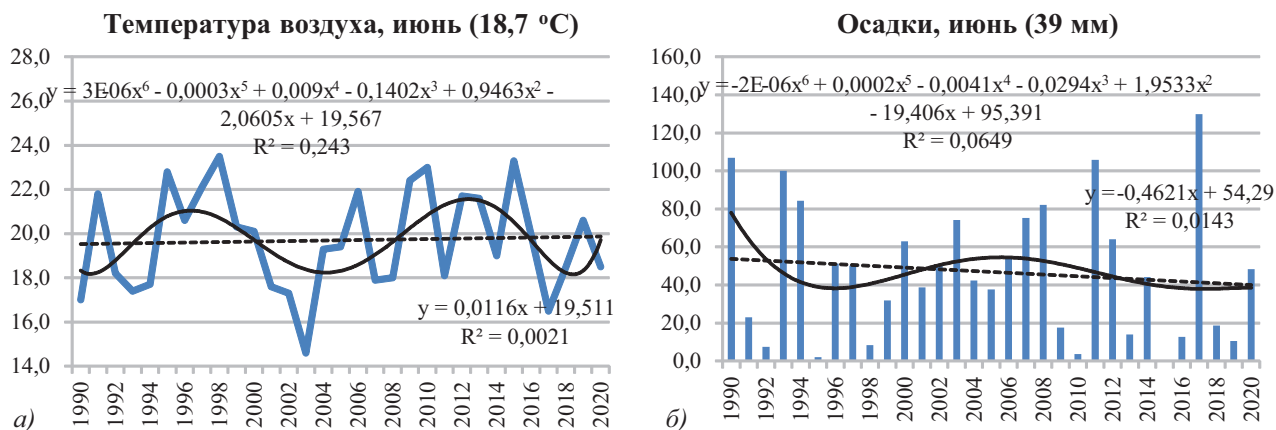


Рис. 2. График изменения среднесуточной температуры воздуха и суммы осадков за июнь с 1990 по 2020 гг.: а) — температура; ———— — линейная (температура); ———— — полиномиальная (температура); б) — осадки; ———— — линейная (осадки); ———— — полиномиальная (осадки).

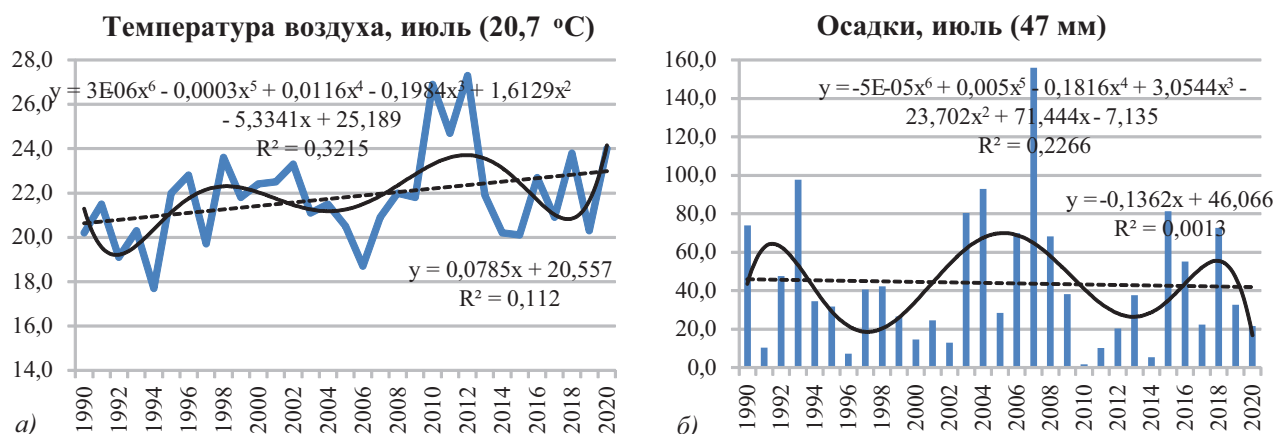


Рис. 3. График изменения среднесуточной температуры воздуха и суммы осадков за июль с 1990 по 2020 гг.: а) — температура; ———— — линейная (температура); ————— — полиномиальная (температура); б) — осадки; ———— — линейная (осадки); ————— — полиномиальная (осадки).

17 мая в 2010–2020 гг. В условиях интенсивного нарастания среднесуточной температуры воздуха и отсутствия осадков в 2021 г., оптимальные сроки сева яровой пшеницы приходились на 2–7 мая, при его проведении в более поздние сроки (с 9 по 12 мая) урожайность снижалась более чем на 30%.

С учетом прогноза сокращения количества осадков и повышения температурного режима в мае, весенне-полевые работы, необходимо проводить в более сжатые и максимально ранние сроки, для обеспечения условий получения дружных всходов. При этом эффективное использование зимне-весенней влаги будет зависеть от сортов раннего срока сева с интенсивным начальным ростом и кушением. При этом к наступлению жары растения должны практически «сомкнуться в рядках», максимально закрыв междурядья. Высокая дневная температура воздуха, установившаяся в мае 2021 г., привела к увеличению температуры поверхности почвы до 58...60°C, что вызвало гибель части растений в фазе начала всходов.

Во второй месяц вегетации растений – июнь, наблюдаются высокие колебания температуры воздуха и суммы осадков по годам, но в целом тренд изменений за исследуемый период плавный (рис. 2). Это видно на обоих графиках по снижению значения коэффициента линейной регрессии относительно мая. По расчетным данным среднесуточная температура воздуха в июне к 2030 г. со-

ставит в среднем 20,0°C (+1,3° к норме), а сумма осадков снизится в среднем до 35,4 мм (-3,6 мм). Условия июня в среднем прогнозируются благоприятными для роста и развития яровой пшеницы. На этот месяц приходится фазы развития, связанные с формированием продуктивного стеблестоя, числа колосков в колосе и числа цветков в колосках, кроме того, от погодных условий будет зависеть фертильность пыльцы и яйцеклеток. В последние годы в особо жарких и засушливых условиях на некоторых сортах уже наблюдается так называемая «череззерница», которая играет существенную роль в снижении продуктивности сортов, неадаптированных к жарким условиям и тепловому шоку, связанному, в том числе, с высокими ночными температурами воздуха.

В июле отмечается более высокий темп прироста среднесуточной температуры воздуха (+0,078°C в год; R²=0,112), которая к 2030 г. может составить в среднем 23,8°C (+3,1° к среднегодовым значениям). По осадкам, как и в предыдущем месяце, прогнозируется снижение суммы за месяц – до 40,5 мм, что на 6,5 мм меньше климатической нормы июля (рис. 3).

В июле яровая пшеница проходит такие фазы развития, как полное колошение, цветение, налив зерна и молочная спелость. От условий их прохождения зависят озерненность колоса и величина зерновки (крупность, плотность). Поэтому для сохранения и повышения уровня потенци-

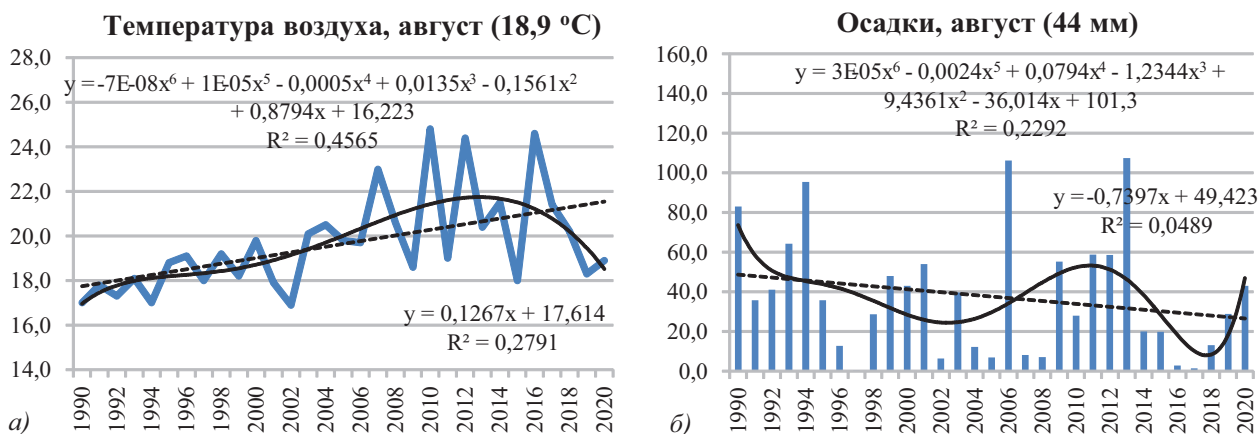


Рис. 4. График изменения среднесуточной температуры воздуха и суммы осадков за август с 1990 по 2020 гг.: а) — температура; ———— — линейная (температура); ————— — полиномиальная (температура); б) — осадки; ———— — линейная (осадки); ————— — полиномиальная (осадки).

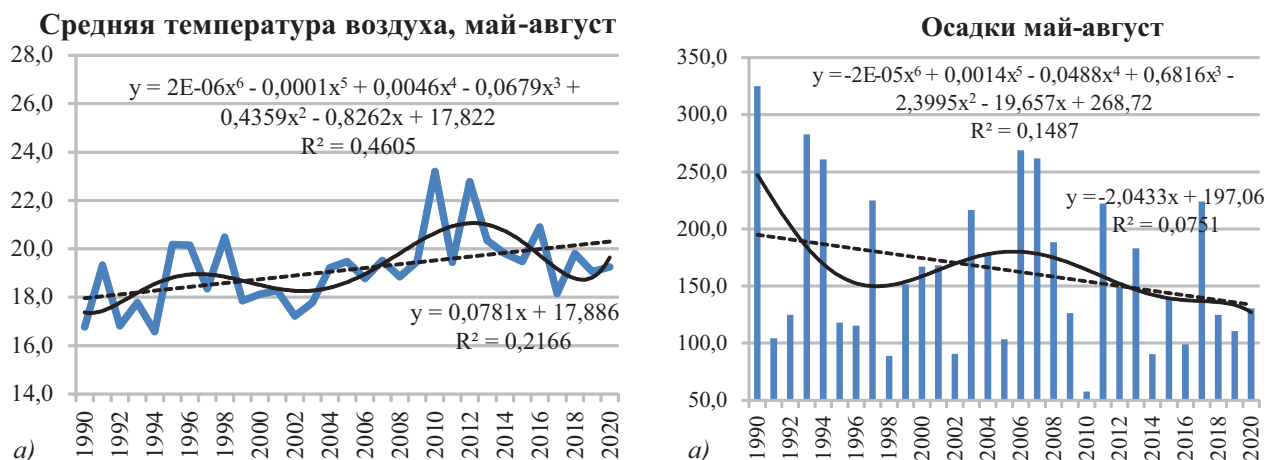


Рис. 5. График изменения среднесуточной температуры воздуха и суммы осадков за период май-август с 1990 по 2020 гг.: а) — температура; ———— — линейная (температура); ———— — полиномиальная (температура); б) — осадки; ———— — линейная (осадки); ———— — полиномиальная (осадки).

альной продуктивности будущих сортов, необходимо обратить внимание на озерненность колоса сортов исходного и селекционного материала в аномально жаркие годы.

Наиболее сильные изменения в последнее десятилетие происходят со среднесуточной температурой воздуха в августе месяце (рис. 4). Согласно уравнению линейной регрессии ее повышение составляет 0,126°C в год ($R^2=0,279$). Согласно графикам и уравнениям регрессии можно прогнозировать, что к августу 2030 г. средняя температура воздуха вырастет до 22,8°C (на 3,9°C выше климатической нормы), а сумма осадков снизится на 24,8 мм и составит в среднем 19,2 мм (43,6% от нормы).

Эти условия будут накладываться на фазы восковой и полной спелости зерна, когда происходит формирование таких важных элементов продуктивности, как выполненность и масса зерновки, влияющие на продуктивность растения. Величины этих показателей определяют не только формирование уровня урожайности культуры, но и его качественные характеристики, влияющие на выход муки. В стратегическом плане, уже сейчас, необходимо подбирать исходный материал для скрещиваний, устойчивый по этим признакам к предстоящим изменениям погодных условий, возможно и в ущерб высокой потенциальной продуктивности новых сортов. Необходимо также отметить, что все более часто наблюдаемые жаркие и засушливые условия в течение вегетации яровых зерновых, могут привести к тому, что уборка, преимущественно, сдвинется на конец июля.

В целом погода в период условной вегетации ранних зерновых культур (май-август), согласно расчетам по уравнениям линейной регрессии, в среднем к 2030 г. изменится следующим образом (рис. 5):

средняя температура воздуха за период май-август составит 21,1°C (+3,0°C к среднесуточной норме). При этом по аналогии с 2010–2020 гг. будут наблюдаться более высокие колебания значений по годам в сторону повышения среднесуточной температуры воздуха, а более низкие величины будут близки к среднесуточному (18,1°C). Таким образом, в предстоящее десятилетие можно ожидать в некоторые годы, повышения среднесуточной температуры воздуха за «условную вегетацию» до 24,1°C, что на 0,9°C выше аномально жаркого 2010 г.;

количество выпавших осадков за период май-август к 2030 г. сократится в среднем до 113,2 мм (-49,8 мм к среднесуточному значению).

Существенные изменения погодных условий за тридцатилетний период и, особенно за последнее десятилетие,

повлияли на продолжительность вегетации яровой мягкой пшеницы. Оптимальные сроки сева культуры, с учетом физиологической спелости почвы и погодных условий в 1990–1999 гг., согласно фенологическим наблюдениям, приходились на 26.04-21.05 (в среднем по годам на 8-9 мая), уборочная спелость культуры наступала 05.08-07.09 (в среднем за десятилетие 22 августа). Во втором периоде (2000–2009 гг.) средние сроки сева яровой пшеницы условно приходились на 07 мая, что на 1,5 суток раньше предыдущего десятилетия, но при этом интервал сроков сева по годам сократился до 14 суток (30.04-13.05). Несколько более высокий температурный фон летних месяцев, особенно августа, ускорил созревание культуры примерно на 3 суток, по сравнению с первым десятилетием (по годам – с 12.08 по 31.08, в среднем – 19 августа). В третий период (2010–2020 гг.) сроки сева в среднем приходились на 8-9 мая (по годам с 27.04 по 19.05), что практически соответствует первому десятилетию, но сроки уборочной спелости в среднем уже приходились на 14 августа (по годам 04.08-02.09), что на 8 суток раньше первого десятилетия.

Негативное влияние изменения погодных условий на рост и развитие яровой мягкой пшеницы за исследуемый период можно проследить по урожайности сорта Кинельская 59 в питомниках размножения первого и/или второго года. Анализ этих данных и расчеты по уравнению линейного тренда: $Y_{K59} = -0,124x + 17,91$ ($R^2 = 0,027$), свидетельствуют о том, что в условиях повышения среднесуточной температуры воздуха и снижения количества осадков за вегетацию она ежегодно снижается условно на 12,4 кг/га. Одновременно урожайность новых сортов и линий конкурсного испытания увеличилась на 14,8 кг/га в год ($y = 0,148x + 17,90$; при $R^2 = 0,034$).

Несмотря на высокий положительный эффект селекционной работы, который выражается в ежегодной прибавке урожайности новых сортов и линий 27,2 кг/га (12,4+14,8 кг), в ближайшие годы потребуются создание для региона еще более засухо- и жаростойких сортов пшеницы и других сельскохозяйственных культур. Для их выведения необходимо в первую очередь изменить подход к подбору родительских форм для гибридизации с учетом предстоящих климатических изменений даже на короткую перспективу. Несмотря на то, что изучение коллекционного материала проводится в институте давно, а с 1990 г. объемы исследований были существенно увеличены – до 450 образцов в год, основная задача при их

изучении заключалась в выделении из разнообразия сортов источников и доноров хозяйственно-ценных признаков и свойств с высокими значениями средних показателей за годы исследований, необходимых для создания сортов интенсивного и полунинтенсивного типа с высоким потенциалом продуктивности. Такая стратегия повсеместно была связана с так называемой «зеленой революцией» 1960-х гг. и имела огромный успех во всем мире. Однако погодные аномалии начала XXI в. и более частые их проявления в последнее десятилетие даже в условиях Европы, могут свидетельствовать о том, что существующие программы и методы селекции недостаточно подготавливают европейские сорта пшеницы и других основных продовольственных культур к климатической неопределенности и изменчивости [21]. Гонка за высоким потенциалом продуктивности новых сортов в условиях глобального потепления даже на 1,0 °C привела в последние годы к существенным недоборам валовой продукции зерна по всему миру.

Таким образом, в Самарской области повышение среднесуточной температуры воздуха вегетационного периода с 1990 по 2030 гг. (прогноз) в среднем на 3,0°C (фактическое повышение в 2021 г. составило 4,9°C). При этом сумма осадков снизится в среднем на 49,8 мм (в 2021 г. – снижение 51,6 мм), ГТК к концу прогнозного периода может уменьшиться в среднем до 0,44 (климатическая норма на начало периода составляла 0,73). С учетом предстоящих изменений погодных условий в регионе необходимо также выявление разнообразия откликов сортов коллекционного материала на меняющиеся условия и выделение для программ адаптивной селекции форм с минимальной реакцией на абиотические факторы среды, которые уже складывались в такие аномально жаркие и засушливые годы, как 2010 г. (ГТК вегетационного периода 0,20, осадков минус 105,3 мм от нормы, среднесуточная температура воздуха выше на 5,1°C), 2016 г. (ГТК 0,38, осадки минус 64,0 мм, температура +2,8°C) и 2021 г. (ГТК 0,39, осадки минус 51,6 мм, температура воздуха +4,9°C).

Литература.

1. Futuyma D.J. *Evolution*. Sunderland: Sinauer Associates. 2005. 543p.
2. Barker J.S.F. *Defining fitness in natural and domesticated populations* // *Adaptation and Fitness in Animal Populations* / ed. Van der Werf J., et al. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. P. 3–14.
3. Hansen J., Sato M. and Ruedy R. *Perception of climate change* // *PNAS*. 2012. 109(37). P. 2415–2423. doi:10.1073/pnas.1205276109.
4. Battisti D.S., Naylor R.L. *Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat* // *Science*. 2009. 323(5911). P. 240–244. doi:10.1126/science.1164363.
5. *Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2021. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf (дата обращения 14.11.2021).
6. *Climate variation explains a third of global crop yield variability* / D.K. Ray, J.S. Gerber, G.K. MacDonald, et al. // *Nature Communications*. 2015. 6(5989). P. 1–9. URL: <https://www.nature.com/articles/ncomms6989> (дата обращения 14.11.2021). doi:10.1038/ncomms6989.
7. Грабовец А.И., Фоменко М.А. *Стабильность урожая в широком диапазоне сред – основной параметр при селекции озимой пшеницы*. – *Российская сельскохозяйственная наука*. 2020. № 5. С. 3–7. doi:10.31857/S2500262720050014.
8. Сапега В.А., Турсумбекова Г.Ш. *Урожайность, экологическая пластичность и стабильность сортов яровой мягкой и твердой пшеницы в южной лесостепи Тюменской области* // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020. Т. 21. № 2. С. 114–123. doi:10.30766/2072-9081.2020.21.2.114-123.
9. *Современные сорта яровой мягкой пшеницы для лесостепной зоны Средневолжского региона* / Е.А. Дёмина, А.И. Кинчаров, Т.Ю. Таранова и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. № 10. С. 16–21. doi:10.24411/0235-2451-2020-11002.
10. *Адаптивный потенциал сортов пшеницы (озимой, яровой мягкой и яровой твердой) селекции Омского аграрного научного центра* / М.Г. Евдокимов, И.А. Белан, В.С. Юсов и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 10. С. 9–15. doi:10.24411/0235-2451-2020-11001.
11. Кинчаров А.И., Таранова Т.Ю., Дёмина Е.А. *Специфическая реакция сортов яровой мягкой пшеницы на погодные условия* // *Вестник КрасГАУ*. 2020. № 9. С. 61–69. doi:10.36718/1819-4036-2020-9-61-68.
12. *Оценка адаптивности сортов яровой мягкой пшеницы в лесостепных условиях Среднего Поволжья* / Е.А. Дёмина, А.И. Кинчаров, Т.Ю. Таранова и др. // *Аграрный вестник Урала*. 2021. № 11 (214). С. 8–19. doi:10.32417/1997-4868-2021-214-11-8-19.
13. *Yield components, reproductive allometry and the tradeoff between grain yield and yield stability in dryland spring wheat* / Du Y.-L., Xi Y., Cui T. et al. // *Field Crops Research*. 2020. 257. 107930. doi:10.1016/j.fcr.2020.107930
14. Немцев С.Н., Шарипова Р.Б. *Агроклиматические ресурсы, их изменение и экологические ограничения вегетационного периода Ульяновской области* // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. № 3. С. 10–14. doi:10.24411/0235-2451-2021-1030
15. Жученко А.А. *Адаптивное растениеводство*. Кишинев: Штиинца. 1990. 432 с.
16. Гончаров Н.П., Косолапов В.М. *Селекция растений – основа продовольственной безопасности России* // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021. Т. 25. № 4. С. 361–366. doi:10.18699/VJ21.039
17. Путин В.В. *Особенно нас беспокоит таяние вечной мерзлоты* // *Газета.Ru*. URL: <https://www.gazeta.ru/social/2021/10/31/14154643.shtml?updated> (дата обращения 15.11.2021).
18. Kushnir, Y., Scaife, A.A., Arritt, R. et al. *Towards operational predictions of the near-term climate* // *Nature Climate Change*. 2019. 9. P. 94–101. doi:10.1038/s41558-018-0359-7.
19. *Методика Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур*. М. 2019. Выпуск первый. Общая часть. 329 с. URL: https://gossortrf.ru/wp-content/uploads/2019/08/metodica_1.pdf (дата обращения 14.11.2021).
20. Мартынов С.П., Мусин Н.Н., Кулагина Т.В. *Пакет программ, селекционно-ориентированных и биометрико-генетических методов «Agros»*. Тверь, 1993.
21. *Decline in climate resilience of European wheat* / H. Kahiluoto, J. Kaseva, J. Balek, et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019. 116(1). P. 123–128. doi:10.1073/pnas.1804387115.

Поступила в редакцию 14.10.2021
После доработки 18.11.2021
Принята к публикации 25.01.2022

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЗЕРНА ПОПУЛЯЦИЙ ОЗИМОЙ РЖИ С РАЗЛИЧНОЙ ВЯЗКОСТЬЮ ВОДНОГО ЭКСТРАКТА

А.А.Гончаренко¹, академик РАН, В.Я.Черных², доктор технических наук, А.В.Макаров¹, доктор сельскохозяйственных наук, Н.Ю.Быкова², кандидат технических наук, Е.В.Карпушина², кандидат технических наук, Н.А. Яшина¹

¹Федеральный исследовательский центр «Немчиновка»,
143026, Московская обл., г.п. Одинцово, р.п. Новоивановское, ул. Агрохимиков, 6
E-mail: goncharenko05@mail.ru

²Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности,
107553, Москва, ул. Большая Черкизовская, 26А.
E-mail: polybiotest@rambler.ru

Представлены результаты многопараметрической (по 37 показателям) оценки физико-химических характеристик двух популяций озимой ржи, контрастно различающихся по вязкости водного экстракта (ВВЭ) зернового шрота. Материалом для сравнения послужили высоковязкая популяция GK-494-BB ($\eta=12,0$ сПуаз), полученная в результате 10-кратного отбора на высокую ВВЭ, и относительно низковязкий сорт Московская 15 ($\eta=4,1$ сПуаз), который использовали как стандарт. Высокая ВВЭ трудно сочетается с высокой натурой зерна, крупнозерностью и крахмалистостью, но положительно коррелирует с высокобелковостью и твердозерностью. По качеству муки сравниваемые популяции различались сильнее, чем по зерну. Популяция GK-494-BB отличалась более высоким числом падения (164,7 % от стандарта), крупными размерами частиц муки (149,7 %), высоким пиком вязкости крахмального клейстера (146,2 %), высокой температурой клейстеризации крахмала (119,7 %) и более сильной водопоглощительной способностью (123,1 %). Тесто из зерна высоковязкой популяции отличалось значительным превосходством по формоудерживающей (200 % от стандарта), газообразующей (107,9 %) и газоудерживающей (107,4 %) способностям. Формовой хлеб из такого теста имел лучшие структурно-механические свойства мякиша. Характерная особенность высоковязкой ржи – относительно низкий объем формового хлеба (93,9 % от стандарта), низкий удельный объем (93,4 %) и пористость мякиша (91,8 %). Хлеба из высоковязкой муки характеризуется относительно низким упеком (8,6 % против 12,2 %). В результате селекции максимальная вязкость амилпектиновой фракции в сравнении со стандартом повысилась на 4,9 %, амилозной фракции – на 102,6 %, то есть в 20 раз больше. Целевой отбор на высокую ВВЭ коррелятивно повлиял на многие признаки качества зерна озимой ржи. Особенность в том, что эти изменения достигались не только в результате увеличения содержания водорастворимых пентозанов в зерне, но и благодаря влиянию водорастворимой амилозы.

MULTIPLE PARAMETER ASSESSMENT OF QUALITY OF GRAIN OF POPULATIONS OF WINTER RYE WITH VARIOUS VISCOSITY OF WATER EXTRACT

Goncharenko A. A.¹, Chernykh V. Ya²., Makarov A. V.¹, Bykova N. Y.², Karpushina E. V.², Yashina N.A.¹

¹Federal research center «Nemchinovka»,
143026, Moskovskaya obl., g.p. Odintsovo, r.p. Novoivanovskoe, ul. Agrokhimikov, 6
E-mail: goncharenko05@mail.ru

²Scientific research institute of the baking industry
107553, Moskva, ul. Bol'shaya Cherkizovskaya, 26A.
E-mail: polybiotest@rambler.ru

Results multiple parameter (on 37 indicators) estimates of physical and chemical, technological, rheological and baking properties of two populations of winter rye which are contrastly differing on the viscosity of water extract (VWE) of grain meal are presented. As initial material for comparison the high-viscosity population of GK-494-HV ($\eta=12,0$ sPoise) received as a result of 10-fold selection on high VWE, and relatively low-viscous variety Moscow 15 ($\eta=4,1$ sPoise) which was used as the standard. It is established that high VWE is difficult combined with high nature of grain, a large grain and a high contents of starch, but positively correlates with a high contents of protein and hardness of grain. On quality of flour the compared populations differed stronger, than on grain. Population of GK-494-HV differed in higher number of falling (164,7 % of the standard), the large size of particles of flour (149,7 %), the high peak of viscosity of starched paste (146,2 %), high temperature of a kleysterization of starch (119,7 %) and stronger water absorbing ability (123,1 %). Significant superiority of high-viscosity population on a stable form of dough (200 % of the standard), and also on gas-forming (107,9 %) and gas-retaining (107,4 %) abilities is revealed. Square loaf from such dough had the best structural and mechanical properties of a crumb. Characteristic of high-viscosity rye is rather low volume of square loaf (93,9 %), low specific volume (93,4 %) and porosity of a crumb (91,8 %). Rather low is stated bread made from high-viscosity flour (8,6 % vs 12,2 %) that favourably distinguishes population of GK-494-HV from a low-viscous variety Moscow 15. Qualitative distinctions of the main components of starch - amylose and amylopectin are revealed. It is established that as a result of selection the maximum viscosity of amilopektinovy fraction in comparison with the standard increased by 4,9 %, and viscosity fraction from amylose - by 102,6 %, i.e. in 20 times more. The conclusion is made that purposeful selection on high VWE correlatively affected many traits of quality of grain of winter rye. Feature is that these changes were reached not only due to increase in maintenance of water-soluble pentosan in grain, but also due to influence of water-soluble amylose.

Ключевые слова: озимая рожь (*Secale cereale* L), популяция, сорт, вязкость водного экстракта, качество зерна, мука, тесто, хлеб, многопараметрическая оценка.

Key words: winter rye (*Secale cereale* L), population, variety, viscosity of water extract, quality of grain, flour, dough, bread, multiple parameter assessment.

Озимая рожь отличается от пшеницы относительно высоким содержанием в зерне некрахмальных полисахаридов (пентозанов), которые играют важную роль в технологии

выпечки ржаного хлеба [1]. Эти полисахариды служат основными веществами, связывающими воду при замесе теста, увеличивают его вязкость и улучшают физические

свойства [2]. Установлено, что их суммарное содержание в зерне ржи варьирует от 7,0 до 13,0 % [3]. По отношению к воде они подразделяются на водорастворимые и водонерастворимые. Водонерастворимые пентозаны (ВНП) большей частью содержатся в оболочках клеток, водорастворимые (ВРП) – внутри их содержимого. Считается, что зерно ржи с высоким содержанием суммарных пентозанов более пригодно для производства хлеба, так как они, адсорбируясь на поверхности крахмала и белков ржаной муки, уменьшают скорость процесса набухания, а также способствуют снижению их атакующести ферментами [4, 5]. Особую роль в хлебопечении играют ВРП, на долю которых в структуре суммарных пентозанов приходится 20...38% [6]. Их ценное свойство – способность давать высоковязкие водные растворы при относительно низком содержании, что очень важно при приготовлении ржаного теста [7, 8].

Отмеченные особенности позволяют объяснить, почему практически все возделываемые сорта ржи относятся к категории хлебопекарных и мало соответствуют требованиям, предъявляемым к кормовому зерну. Причина в том, что задачи селекции ржи на хлебопекарную и зернофуражную пригодность не совпадают, их следует решать по разным селекционным программам [9]. Зернофуражная рожь в отличие от хлебопекарной должна иметь высокое содержание белка и относительно низкое содержание пентозанов, особенно водорастворимой их фракции [10]. Ранее селекции ржи в этом направлении не проводили, но в последние годы проблема пентозанов у ржи стала больше привлекать внимание селекционеров. Было установлено [11], что содержание водорастворимых пентозанов в зерне ржи находится в прямой зависимости от вязкости водного экстракта (ВВЭ) зернового шрота ($r=0,97$). Это послужило основанием для использования показателя ВВЭ в качестве косвенного критерия при определении содержания пентозанов в зерне ржи.

Выяснилось также, что пентозаны неоднородны по своей молекулярной массе, а потому могут иметь различную ВВЭ при равной их концентрации [12]. Сравнение двух контрастных по молекулярной массе групп пентозанов показало [13], что биополимеры с высокой плотностью замещения остатков сиалозы теснее коррелируют с ВВЭ, чем пентозаны с меньшей плотностью такого замещения. Это указывает на высокую информационную ценность признака ВВЭ в отношении биохимической структуры пентозанов. Именно количественное содержание и внутренняя структура ВРП в определенной степени определяют вектор использования зерна ржи. С одной стороны, при повышении содержания они уменьшают питательную ценность кормового зерна, с другой – наоборот, улучшают хлебопекарные свойства ржаной муки [14]. В селекционном аспекте важно то, что уровень ВВЭ зернового шрота может служить хорошим индикатором целевой пригодности зерна озимой ржи.

В свете изложенного особый интерес представляет сравнение сортов озимой ржи с контрастной ВВЭ. Впервые такие сорта удалось создать в ФИЦ «Немчиновка» в результате длительной селекции озимой ржи на высокую и низкую ВВЭ. Для этого разработали методику оценки селекционного материала по признаку ВВЭ с использованием ротационного вискозиметра и провели 10 циклов дивергентного отбора по ВВЭ на базе сортов ржи Альфа и Московская 12 [15]. В результате были получены уникальные популяции ржи, отличающиеся высокой контрастностью по признаку ВВЭ. Высоковязкие популяции (обозначенные как ВВ) превышали исходную форму по ВВЭ в 3,3... 6,0 раз, а низковязкие (НВ) уступали ей по этому признаку в 2,6... 3,5 раза. Их предварительное изучение показало, что высоковязкие популяции характеризуются более высокой урожайностью и лучшим качеством зерна, чем низковязкие. Наиболее вы-

сокий коррелятивный эффект достигался по натуре зерна, числу падения, высоте амилограммы, формоустойчивости хлеба, структурно-механическим свойствам мякиша готового изделия. Было сделано заключение, что селекция на высокую ВВЭ позволяет существенно улучшить многие хлебопекарные свойства зерна ржи.

Селекционная оценка дивергентных по вязкости популяций выявила необходимость их более глубокого изучения. Так как высоковязкие популяции содержат много ВРП, а низковязкие – относительно мало, то практически важно знать, как сильно на фоне изменения потенциала ВВЭ будут изменяться различные физико-химические характеристики ржи, в том числе обуславливающие её хлебопекарные свойства. Вопрос о коррелятивной изменчивости различных признаков качества в зерне высокой вязкости в научной литературе пока что остается открытым, поэтому его рассмотрение представляет большой научный и практический интерес. Для более четкой дифференциации исходного селекционного материала необходимо помимо определения содержания ВРП разработать более совершенные методы технологической оценки высокопентозановых сортов ржи.

Цель исследований – многопараметрическая оценка физико-химических характеристик популяций озимой ржи, отличающихся высокой контрастностью по признаку ВВЭ. Ставилась задача расширить число показателей, контролируемых важные грани качества зерна ржи, с тем чтобы более эффективно использовать зерновые ресурсы этой культуры.

Методика. Исходным материалом для изучения послужили высоковязкая популяция ГК-494-ВВ ($\eta=12,0$ сП) и относительно низковязкий сорт Московская 15 ($\eta=4,1$ сП), который использовали в качестве стандарта для сравнения. Сорт Московская 15 включен в Госреестр селекционных достижений РФ и с 2016 г. допущен к использованию по Северо-Западному, Центральному и Волго-Вятскому регионам. Высоковязкая популяция ГК-494-ВВ получена в результате скрещивания двух высоковязких образцов ржи (Мос-12-ВВ и Альфа-ВВ), созданных методом многократного отбора растений с высокой ВВЭ зернового шрота (за 2004–2013 гг. проведено 10 циклов) [16]. Сравнительное испытание популяции ГК-494-ВВ и сорта Московская 15 на качество зерна проводили в 2017 г. на опытном поле ФИЦ «Немчиновка» на делянках 15 м² в четырех повторениях. После уборки от каждой популяции отбирали среднюю пробу зерна массой 15 кг для оценки его физико-технологических и мукомольно-хлебопекарных качеств по различным показателям (табл. 1).

Относительную ВВЭ из цельносмолотой и обдирной муки измеряли в сантипуазах (сП) на ротационном вискозиметре VT5L/R (Германия) по методике А.С. Тимошенко и др. [17].

Принципиальным отличием такого подхода было то, что при оценке реологического поведения клейстеризованной суспензии, кроме числа падения, дополнительно использовали следующие параметры:

показатели твердозерности зерна, отражающие его структурно-механические свойства; их определяли с использованием информационно-измерительной системы (ИИС) на базе прибора «Полиреотест ПРТ-1» с измельчающим устройством [18];

реологические показатели ржаного теста, устанавливаемые на приборе «Faginogaph-E», которые дают возможность получать интегральную оценку состояния всех биополимеров ржаной муки, обуславливающих её хлебопекарные свойства.

Лабораторный помол зерна ржи в обдирную муку проводили на мельнице «Нагема». Продолжительность отлаживания каждой пробы ржи составляла 4 ч, массовая

Табл. 1. Показатели зерна, обдирной муки, теста и хлеба, по которым проводили многопараметрическую оценку двух популяций ржи

Параметр	Марка приборов
Натура зерна, г/л	ПХ-1МЦ
Масса 1000 зерен, г	Contador
Содержание белка, крахмала, %	Spectra Star 2400
Показатели твердозерности:	Полиреотест
количество удельной механической энергии, затраченной на измельчение зерна, кДж/кг	ПРТ-1
индекс твердости зерна, Н·м / % с.в.	
Белизна, ед. приб. РЗ-БПЛ	Блик-РЗ
Влажность муки, %	МА-150
Число падения, с	Амилотест
Максимальная вязкость крахмального клейстера (F_{max}), е.а.	АТ-97(ЧП-ТА)
Температура максимальной вязкости клейстера, °С	
Средний эквивалентный диаметр частиц муки, мкм	Гранулометр ГИУ-1
Время образования гомогенной структуры теста, мин	Farinograph - E
Водопоглощительная способность, %	
Разжижение ржаного теста, е.Ф.	
Количество механической энергии, затраченной на формирование гомогенной структуры теста, кДж/кг	
Эффективная вязкость теста после замеса, Па·с	Структурометр СТ-2
Продолжительность созревания теста и окончательной расстойки тестовых заготовок, с	Rheofermentometre F-3
Газообразующая способность, %	
Газоудерживающая способность, %	
Удельный объем формового хлеба, г/см ³	Прибор ОХЛ-2
Пористость мякиша, %	Пробник Журавлева

доля влаги в зерне перед I драной системой – 14,0%. Оценка технологических свойств ржаной муки включала определение среднего эквивалентного диаметра частиц (прибор «Гранулометр ГИУ-1»), далее измеряли «число падения» (прибор «Амилотест АТ-97(ЧП)») и показатель ее белизны (прибор Блик-РЗ), подтверждающий сорт перерабатываемой муки. Оценка реологического поведения клейстеризованной водно-мучной суспензии проводили по показателям амилограммы и тестограммы на базе прибора «Амилотест АТ-97(ЧП-ТА)» [19]. Определяли параметры, отражающие реологическое поведение ржаного теста при его замесе, то есть характеристики, раскрывающие гелеобразующую способность биополимеров ржаной муки при формировании коагуляционной структуры теста с учетом водопоглощительной способности муки. Для оценки хлебопекарных свойств ржаной муки измеряли эффективную вязкость замешенного теста. Контроль реологического поведения ржаного теста в процессе замеса осуществляли с помощью прибора «Farinograph E» по показателям фаринограммы. При замесе вносили определенное количество воды, которое обеспечивало получение ржаного теста с консистенцией на уровне 300 ± 15 е. Ф.

Интегральную оценку технологических свойств ржаной муки по органолептическим и физико-химическим показателям качества хлеба, изготовленного в результате пробной лабораторной выпечки, осуществляли по методике ФГАНУ НИИХП [19, 20, 21]. Выпечку выполняли при условии опти-

мизации биотехнологических операций созревания теста и окончательной расстойки тестовых заготовок по параметрам реоферментограммы. Тестовые заготовки массой 1200 г каждая выпекали в лабораторной печи при температуре 230 °С. Продолжительность выпечки хлеба составляла 65 мин. Готовые изделия хранили при температуре 20...23 °С. Оценку качества выпеченного хлеба по органолептическим и физико-химическим показателям проводили через 16...18 ч в соответствии с существующими методами. Формоустойчивость подового хлеба измеряли как отношение высоты (Н) к диаметру (D), а качество формового – путем измерения объемного выхода хлеба и сенсорной оценки показателей качества мякиша (цвета, липкости, эластичности). Пористость мякиша определяли в процентах по ГОСТ 5669-96 с использованием пробника Журавлева [19].

Результаты и обсуждение. Сравнимые популяции ржи существенно различаются по многим показателям (табл. 2, рис. 1). Отличительной особенностью высоковязкой популяции ГК-494-BB по зерну, в сравнении с сортом Московская 15 (см. рис. 1, а), служит относительно низкая натура зерна (96,9% от стандарта), масса 1000 зерен (91,5%) и содержание крахмала (92,7%). Положительную экспрессию продемонстрировали только два признака: содержание белка (104,8% относительно стандарта) и твердозерность, которую выражали через показатели удельного количества энергии на измельчение пробы зерна (110,0%) и индекс прочности (112,5%). Результаты анализа свидетельствуют, что различия по перечисленным признакам обусловлены их коррелятивной зависимостью от уровня вязкости водного экстракта, по которой проводили отбор. Аналогичные выводы были сделаны ранее по результатам многократного дивергентного отбора по признаку ВВЭ [15]. В этом сравнении такая взаимосвязь сильнее всего проявилась по массе 1000 зерен, из чего следует, что высокая вязкость водного экстракта трудно сочетается с крупнозерностью. Что касается твердозерности, то она положительно отразилась на других показателях качества.

По качеству муки сравнимые популяции различались еще больше, чем по зерну (см. рис. 1, б.). Прежде всего, следует отметить крупный размер частиц муки из зерна популяции ГК-494-BB (149,7% от стандарта), высокое число падения (164,7%), высокий пик вязкости крахмального клейстера на амилограмме (146,2%), температуру, при которой он достигается (119,7%), а также высокую водопоглощительную способность (ВПС) муки (123,1%). Обращает на себя внимание также сравнительно высокий выход муки (107,7%) и относительно низкий выход отрубей (58,7%). Эти особенности, вероятно, обусловлены различиями структурно-механических свойств зерна сравнимых популяций, в частности по признаку твердозерности. Благодаря этому эндосперм высоковязкой ржи при помолу разрушается преимущественно по границам клеток, из-за чего образуются более крупные частицы муки (в нашем опыте 255,2 мкм против 170,5 мкм), мука получается более зернистой, рассыпчатой и лучше просеивается. Можно предположить, что зерновка высоковязкой ржи содержит более тонкостенные плодовые оболочки, что и определяет пониженный выход отрубей.

Водорастворимые пентозаны ржаной муки, о высоком содержании которых косвенно можно судить по показателю ВВЭ, оказывают существенное влияние на число падения (209 с против 127 с) и процесс клейстеризации крахмала. Эти слизистые вещества, окружая зерна крахмала и набухшие гранулы белка, затрудняют атакуемость крахмала ферментами, замедляя тем самым весь процесс клейстеризации. При этом в результате взаимодействия белковых веществ со слизями значительно повышается исходная вязкость суспензии и увеличивается максимум амилограммы [22].

Табл. 2. Сравнительная оценка качества зерна у популяций ржи с различной вязкостью водного экстракта

Материал	Признак	ГК-494-BB (ВВЭ=12,0 сП)	Московская 15 (ВВЭ=4,1сП)	
Зерно	натура, г/л	718	741	
	масса 1000 зерен, г	32,4	35,4	
	содержание крахмала, %	50,7	54,7	
	содержание белка, %	13,2	12,6	
	количество механической энергии, затраченной на измельчение пробы зерна, кДж/кг	875,4	795,6	
Мука	индекс твердости, Н·м / % с.в	0,63	0,56	
	средний эквивалентный диаметр частиц, мкм	255	170	
	выход муки, %	89,26	82,92	
	выход отрубей, %	9,52	16,23	
	белизна муки, ед. пр. РЗ-БПІ	38,1	41,8	
	число падения, с	209	127	
	максимальная вязкость крахмального клейстера (F_{max}), е.а.	0,76	0,52	
	температура начала клейстеризации крахмала ($t_{н.к.}$), °С	63,5	61,0	
	температура максимальной вязкости крахмального клейстера (t_{max}), °С	73,0	68,5	
	водопоглотительная способность, %	53,3	43,3	
	Тесто	газообразующая способность, см ³	1252	1160
		газоудерживающая способность, см ³	1096	1021
		устойчивость теста, мин.	3,5	4,9
время образования теста, мин.		5,3	4,4	
разжижение теста, е.Ф.		28	21	
расход энергии на формирование структуры теста при замесе, W, кДж/кг		9,8	9,1	
«число качества» по фаринографу QN		110	153	
формоустойчивость (отношение высоты к диаметру подового хлеба)		0,46	0,23	
Хлеб	объем формового хлеба, см ³	1240	1320	
	удельный объем хлеба, см ³ /г	1,14	1,22	
	пористость мякиша, %	59,7	65,0	
	влажность мякиша, %	54,0	54,5	
	усушка, %	9,3	10,0	
	упек, %	8,6	12,2	

Важное свойство высоковязкой муки – высокая водопоглотительная способность (53,3 % против 43,3 %). Обусловлено это высокой гидрофильностью водорастворимых пентозанов, которые увеличивают вязкость ржаного теста, что, несомненно, оказывает большое влияние на его реологические свойства. В конечном итоге вязкость ржаного теста определяет выход и устойчивость теста, а также объем хлеба. При увеличении вязкости теста его выход возрастает благодаря удержанию большего количества воды. В результате оно обладает лучшей стабильностью, но испеченный хлеб получается меньшего объема [23].

Сравниваемые популяции заметно различались также по реологическим характеристикам ржаного теста и показателям его замеса (см. рис. 1, в). Обращает на себя внимание повышенная газообразующая (107,9 %) и газоудерживающая (107,4 %) способность высоковязкого теста. Это обусловлено тем, что в газообразующей способности ржаной муки ведущая роль принадлежит амилолитическим ферментам и крахмалу, а в газоудерживающей – водорастворимым пентозанам. Чем больше в муке водорастворимых пентозанов, повышающих вязкость водного экстракта, тем больше газоудерживающая способность теста. В то же время тесто на основе муки из зерна высоковязкого сорта, характеризуется большей водопоглотительной способностью (123,1 %) и временем образования (120,5 %). При этом оно отличается более высокими величинами показателя разжижения и относительно низкой устойчивостью. Различные оценки по этим свойствам объясняются разным соотношением в муке разрушенных и неразрушенных крахмальных зерен, а также

наличием более крупных частиц в обдирной муке, которые определяют скорость и силу осмотического связывания воды со свободным белком и пентозанами, окружающими отдельные крахмальные зерна.

Определенный интерес представляет сравнение изучаемых популяций по качеству испеченного хлеба (см. рис. 1, г). В первую очередь следует отметить двукратное (200 %) превосходство подового хлеба из зерна высоковязкой популяции ГК-494-BB по формоустойчивости. В принципе этого и следовало ожидать, так как ее мука отличается высокой ВВЭ, из-за чего тесто при расстойке почти «не течет» и лучше сохраняет форму. Причиной такой высокой формоустойчивости служит коррелятивный эффект, обусловленный интенсивной селекцией на высокую ВВЭ. Характерной особенностью высоковязкой ржи считают относительно низкий объем формового хлеба (93,9 %), удельный объем (93,4 %) и пористость мякиша (91,8 %). Из этого следует, что объемный выход хлеба непосредственно зависит от вязкости ржаного теста, которую придают ему водорастворимые пентозаны. При высокой вязкости оно способно удерживать большее количество воды и имеет лучшую формоустойчивость, но испеченный хлеб характеризуется меньшим объемом, более упругим мякишем, меньшей липкостью и пористостью. Кроме того, отмечено, что хлеб из высоковязкой муки медленнее черствеет и дольше сохраняет мягкую консистенцию. Таким образом, уровень ВВЭ – важная компонента ржаного теста, которая определяет его водоудерживающую и газоудерживающую способность, что в конечном счете сильно влияет на качество выходного продукта.

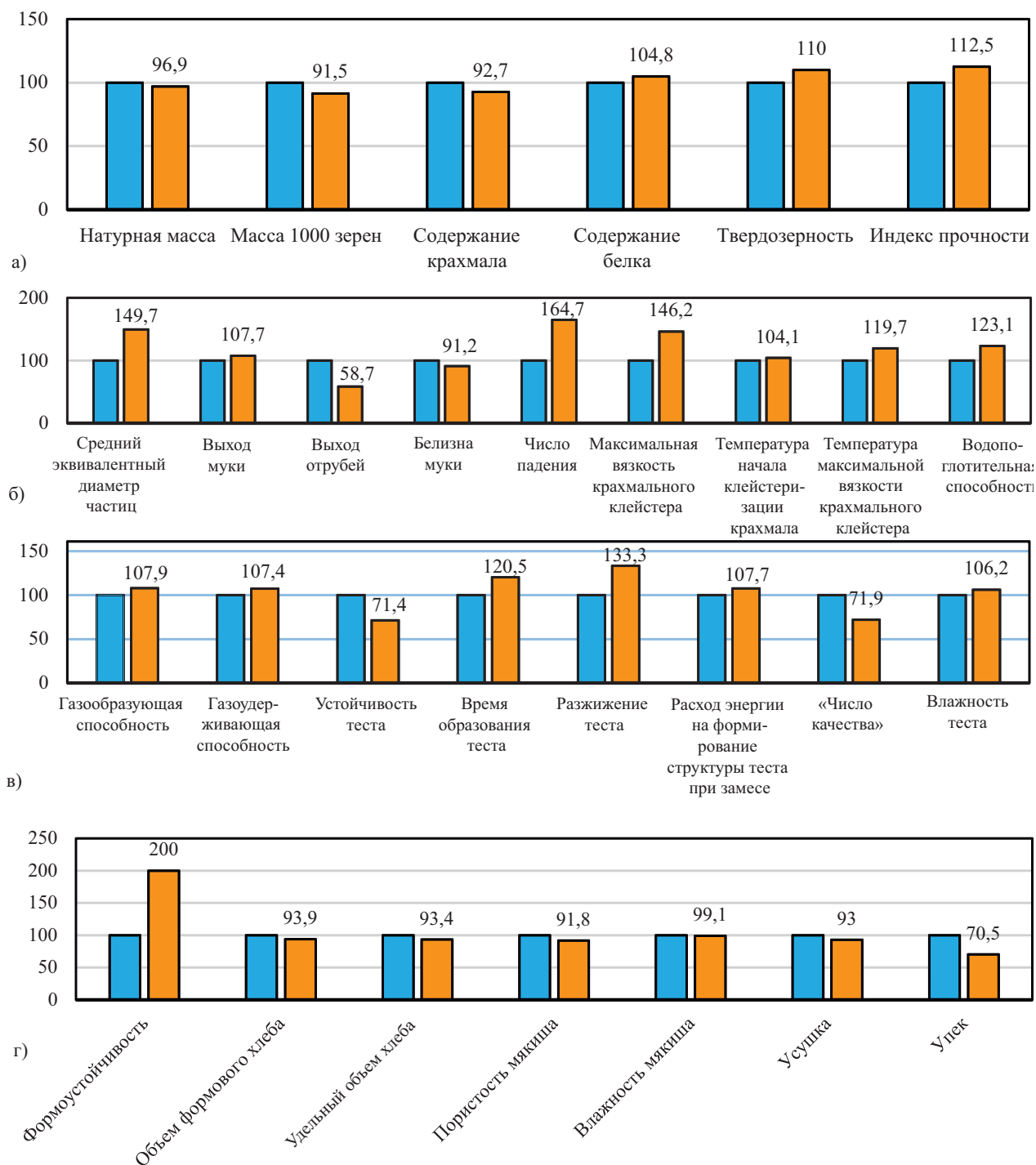


Рис. 1. Оценка признаков качества у высоковязкой популяции ГК-494-ВВ, в сравнении с низковязким сортом Московская 15 (в %, величина признака у Московской 15 = 100 %): а) зерно, б) мука, в) тесто, г) хлеб; ■ – Московская 15, ■ – ГК-494-ВВ.

Большое влияние на экспрессию признаков качества оказывает активность амилолитических ферментов в муке. Если она низкая, то выпекаемый хлеб получается с упругим мякишем и мелкими толстостенными порами, с плоской верхней коркой, что в целом и присуще для изделий из зерна высоковязкой популяции ГК-494-ВВ. Наоборот, формовой хлеб из муки низковязкого сорта Московская 15 хотя и имеет больший объем, но отличается вогнутой верхней коркой, оторванностью мякиша от корки, плохой структурой пористости и

сильно заминающимся, влажным и липким мякишем (рис. 2).

Важная особенность формового хлеба из высоковязкой ржи – относительно низкий упек (70,5 % от стандарта). То есть уменьшение массы тестовой заготовки при выпечке на 29,5 % меньше, чем у стандарта Московская 15. В результате получается, что по мере увеличения ВВЭ зернового шрота возрастает водопоглотительная способность полученной из него муки и выход хлеба из такой муки. Это выгодно отличает



Рис. 2. Поперечный срез формового хлеба из муки популяций: а) ГК-494-ВВ; б) Московская 15.

высоковязкую популяцию ГК-494-ВВ от низковязкого сорта Московская 15.

Как было отмечено ранее, основной вклад в потенциал ВВЭ вносят водорастворимые пентозаны. Что касается роли крахмала, то она до конца не выяснена, хотя известно [22], что все водорастворимые полисахариды дают вязкие растворы из-за большого размера их молекул. Учитывая тот факт, что способность крахмала к клейстерообразованию обусловлена наличием в нем амилозы и амилопектина,

Табл. 3. Сравнительная оценка качества амилозы и амилопектина у популяции ГК-494-ВВ и сорта Московская 15

Признак	ГК-494-ВВ ВВЭ = 12,0 сП	Московская 15 ВВЭ = 4,1 сП
Амилоза		
Максимальная вязкость (f_2), Н	0,316	0,156
Температура максимальной вязкости (t_2), °С	69,0	69,8
Скорость деструкции (λ_2), с ⁻¹	-0,048	-0,081
Расход удельной энергии на деструкцию (e_2), Дж/г	0,587	0,150
Амилопектин		
Максимальная вязкость (f_1), Н	0,384	0,366
Температура максимальной вязкости (t_1), °С	77,4	72,1
Скорость деструкции (λ_1), с ⁻¹	-0,011	-0,026
Расход удельной энергии на деструкцию (e_1), Дж/г	0,812	0,319

мы провели сравнительную оценку изучаемых популяций ржи по 4 качественным показателям этих компонентов. Результаты этих исследований свидетельствуют (табл. 3), что максимальная вязкость амилозной фракции крахмала зерна обеих популяций была ниже, чем амилопектиновой, что можно объяснить ветвистым строением молекулы последней. Сходные различия проявились и по другим признакам: температуре максимальной вязкости, расходу удельной энергии на деструкцию, по которым преимущество имела та же амилопектиновая фракция.

В то же время многократный отбор высоковязких генотипов обусловил заметные качественные изменения как по амилозе, так и по амилопектину (рис. 3). Высоковязкая популяция ГК-494-ВВ, в сравнении с сортом Московская 15, отличалась замедленной скоростью деструкции обоих полисахаридов (по амилозе она составила 59,3 % от стан-

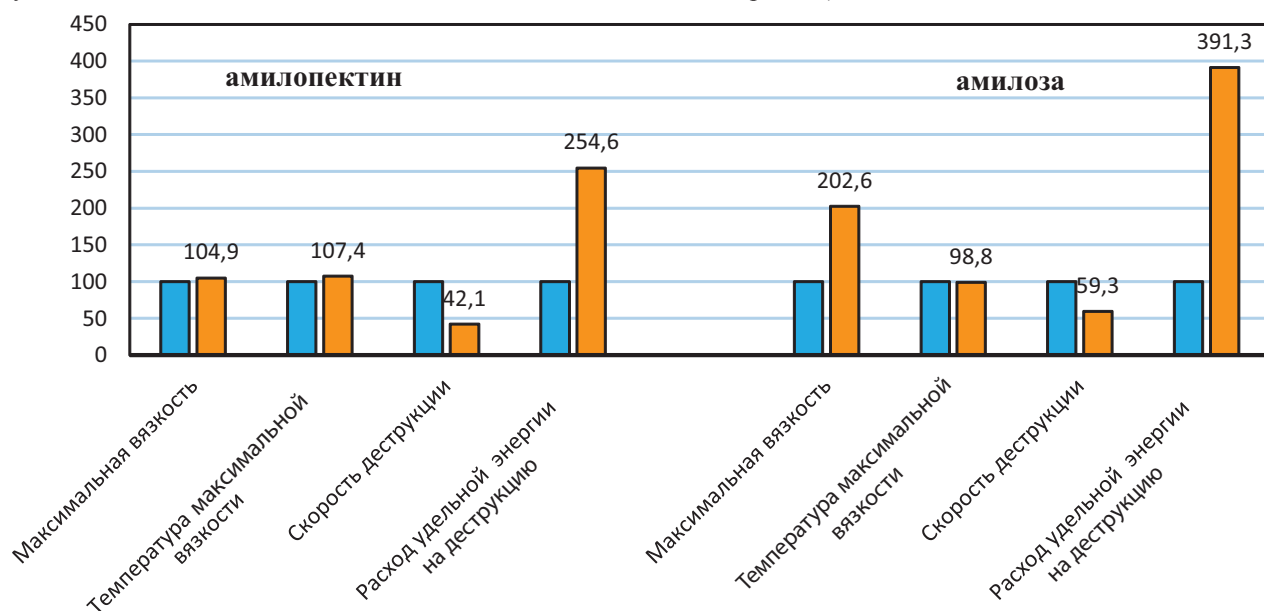


Рис. 3. Сравнительная оценка качества амилопектина и амилозы у двух популяций ржи (в %, величина признака у Московской 15 принята за 100 %): ■ – Московская 15; ■ – ГК-494-ВВ.

дарта, а по амилопектину – 42,1 %). В конечном итоге это привело к резкому увеличению расхода удельной энергии на разрушение их структуры (по амилозе – до 391,3 %, по амилопектину – до 254,6 %).

Однако по максимальной вязкости реакция амилопектиновой и амилозной фракций была неоднозначной. В результате интенсивной селекции на высокую ВВЭ уровень вязкости амилопектиновой фракции, в сравнении со стандартом, повысился всего лишь на 4,9 %, тогда как вязкость амилозной фракции увеличилась на 102,6 %, то есть была в 20 раз больше. Из этого следует, высокий потенциал ВВЭ, достигнутый методом селекции, был обусловлен не только более высоким содержанием водорастворимых пентозанов в зерне, но и дополнительным вкладом со стороны амилозы. На наш взгляд, это объясняет более высокая водорастворимость амилозной фракции, по сравнению с амилопектиновой, в результате чего многократный отбор на высокую ВВЭ затронул именно эту крахмальную фракцию.

Таким образом, многосторонняя оценка качества зерна разных по ВВЭ популяций ржи показала, что высоковязкая форма ГК-494-ВВ по ряду физико-химических, технологических и хлебопекарных свойств существенно отличается от стандарта Московская 15. Положительный коррелятивный эффект селекции на высокую ВВЭ в наибольшей степени проявился по таким признакам как твердозерность, число падения, выход отрубей при помоле, средний размер частиц муки, водопоглотительная, газообразующая и газодерживающая способность муки, температура максимальной вязкости крахмального клейстера. Отмечено значительное улучшение реологических свойств высоковязкого ржаного теста. В совокупности эти отличия способствовали тому, что хлеб из муки высоковязкой ржи характеризовался лучшей формоустойчивостью, имел лучшие структурно-механические свойства мякиша и давал более высокий выход хлеба благодаря низкому упеку. Как негативный эффект проведенного отбора следует отметить меньшее содержание крахмала, натуру зерна, массу 1000 зерен, объем формового хлеба, а также более мелкопористый мякиш.

Полученные результаты позволяют также заключить, что методом целенаправленной селекции на высокую ВВЭ можно существенно влиять на ход процесса клейстеризации крахмала и тестообразования, изменяя в нужную сторону динамику и кинетику реологического поведения клейстеризованной суспензии. Следовательно, методами селекции можно улучшать такие важные параметры фаринограммы ржаной муки как время образования ржаного теста, устойчивость и степень его разжижения, количество механической энергии на формирование структуры теста при замесе и др. В совокупности это открывает большие перспективы применения метода многопараметрической оценки технологических свойств при создании сортов озимой ржи с лучшим качеством зерна.

Литература.

1. Henry R.J. A comparison of the non-starch carbohydrates in cereal grains // *J. Sci. Food and Agric.* 1985. V. 36. No. 12. P. 1243–1253.
2. Weipert D. Pentosans as selection traits in rye breeding // *Vortr. Pflanzenzucht.* 1996. Vol. 35. P. 109–119.
3. Henry R.J. Pentosans and (1-3), (1-4)-beta-glucan concentrations in endosperm and wholegrain of wheat, barley, oats and rye // *J. Cereal Sci.* 1987. No. 6. P. 253–258.
4. Голенков В.Ф. Исследование белковых веществ ржи в связи с условиями формирования ржаной клейковины: автореф. дис. ... кан. биол. наук. М., 1961. 18 с.

5. Малофеева Ю.Н. Совершенствование технологии хлеба с использованием ржаной муки на основе биохимической модификации высокомолекулярных полисахаридов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 25 с.
6. Brummer J.M. Neue rheologische Methoden für die Mullerei // *Getreide Mehl und Brot.* 2002. Vol. 56(2). P. 74–80.
7. Nutrient and lignan content, dough properties and baking performance of rye samples used in Scandinavia / M. Nilsson, P. Aman, H. Harkonen, et al. // *Acta Agric. Scand. Select B.* 1997. Vol. 47. P. 26–34.
8. Bengtsson S., Aman P. Isolation and chemical characterization of water-soluble arabinoxylans in rye grain // *Carbohydrate Polymers.* 1990. Vol. 12 (3). P. 267–277.
9. Madej L., Raczyńska-Bojanowska K., Rybka K. Variability of the content of soluble non digestible polysaccharides in rye inbred lines // *Plant Breed.* 1990. Vol. 104 (4). P. 334–339.
10. Rakowska M. The nutritive quality of rye // *Vortr. Pflanzenzucht.* 1996. No. 35. P. 85–95.
11. Extract viscosity as an Indirect Assay for water-soluble Pentosan Content in Rye / D. Boros, R.R. Marquardt, B.A. Slominski, et al. // *Cereal Chem.* 1993. Vol. 70 (5). P. 575–580.
12. Heterogeneity in a water-extractable rye arabinoxylan with low degree disubstitution / M. Nilsson, R. Anderson, R.E. Anderson, et al. // *Carbohydrate Polymers.* 2000. Vol. 41(4). P. 397–405.
13. Content, structure and viscosity of soluble arabinoxylans in rye grain from several countries / S. Bengtsson, R. Andersson, E. Westerlund, et al. // *J. of Science of Food and Agriculture.* 1992. Vol. 58(3). P. 331–337.
14. Cyran M. R., Ceglinska A. Genetic variation in the extract viscosity of rye (*Secale cereale* L.) bread made from endosperm and wholemeal flour: impact of high-molecular-weight arabinoxylan, starch and protein // *J. Sci. Food Agric.* - 2011. Vol. 21(3). P. 469–479.
15. Многократный дивергентный отбор по вязкости водного экстракта у озимой ржи / А.А. Гончаренко, С.А. Ермаков, А.В. Макаров и др. // *Российская сельскохозяйственная наука.* 2016. №4. С. 3–8.
16. Дивергентный отбор по вязкости водного экстракта у озимой ржи / А.А. Гончаренко, А.С. Тимоценко, Н.С. Беркутова и др. // *Доклады РАСХН.* 2011. № 4. С. 3–8.
17. Тимоценко А.С., Гончаренко А.А., Лазарева Е.Н. Адаптация роторного вискозиметра VT5L/R к определению относительной вязкости водного экстракта зернового шрота озимой ржи // *Сельскохозяйственная биология.* 2008. №5. С. 110–115.
18. Информационно-измерительная система на базе прибора «Полицреотест ПРТ-1» для контроля твердозёрности пшеницы / В.Я. Черных, А.С. Максимов, Н.Ю. Быкова и др. // *Хлебопродукты.* 2020. №8. С. 57.
19. Ауэрман Л.Я. Технология хлебопекарного производства. Санкт-Петербург: Профессия, 2002. 415 с.
20. Черных В.Я., Быкова Н.Ю. Определение технологических свойств ржаной муки // *Кондитерское и хлебопекарное производство.* 2013. №3-4. С. 46.
21. Информационно-измерительные системы мониторинга динамики выпечки ржаного хлеба / Н.Ю. Быкова, В.И. Маклюков, В.Я. Черных и др. // *Хлебопечение России.* 2013. № 3. С. 16.
22. Рожь: производство, химия и технология / В. Бушук, У.П. Кэмпбелл, Э. Древис и др. М.: Колос, 1980. 247 с.
23. Голенков В.Ф., Панкратьева И.А., Приезжаева Л.Г. Биохимические особенности основных сортов озимой ржи // *Тр. ВНИИЗ.* 1970. Вып. 69. С. 161.

Поступила в редакцию 30.11.2021
После доработки 21.12.2021
Принята к публикации 26.01.2022

ФЕНОТИПИЧЕСКОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПШЕНИЦЫ К БУРОЙ РЖАВЧИНЕ: ЭЛЕМЕНТЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ*

Л.Е. Колесников¹, кандидат биологических наук, **Е.К. Колесников**², доктор физико-математических наук, **В.А. Павлошин**³, академик РАН, **С.В. Чернов**², кандидат физико-математических наук, **Ю.Р. Колесникова**⁴, кандидат сельскохозяйственных наук

¹Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,
196601, Санкт-Петербург - Пушкин, Петербургское ш., 2
E-mail: kleon9@yandex.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9
E-mail: e.kolesnikov@spbu.ru

³Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений,
196608, Санкт-Петербург, ш. Подбельского, 3
E-mail: info@vizr.spb.ru

⁴Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова,
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42-44
E-mail: jusab@yandex.ru

Исследование проводили с целью анализа фенотипической изменчивости пшеницы по устойчивости к бурой ржавчине, выявления факторов, определяющих развитие возбудителя, уточнения показателей оценки количественных взаимоотношений в системе патоген-хозяин-среда и построения имитационной модели патогенеза. Наибольшей устойчивостью к болезни обладали высоко-рослые сорта пшеницы, характеризующиеся вертикальным (менее 15°), отклоняющимся (15...45°) и горизонтальным (46...90°) расположением флагового листа, сильным восковым налетом (9 баллов), листьями с плотностью опушения 941,7±63,8 трихом на 1 см² и длиной трихом 2,2±0,1 мм. В основе предложенной системы метеопатологического прогноза бурой ржавчины лежало определение корреляционных взаимосвязей между числом пустул, площадью пустулы возбудителя, метеорологическими факторами, солнечной активностью. Построена факторная модель, описывающая сопряжённость развития бурой ржавчины и возбудителей смешанной инфекции листьев на сорте Ленинградская 6, фитометрических характеристик посевов, продуктивности, метеорологических факторов, солнечной активности. Она дает возможность проводить системный анализ изменения указанных показателей в зависимости от факторов окружающей среды. В частности, с ее использованием установлено, что развитие бурой ржавчины усиливается с ростом суммы осадков в июне и зависит от суммы температур мая выше 10 °С. Усиление поражения флагового листа пшеницы септориозом и мучнистой росой приводит к снижению развития бурой ржавчины. Имитационная модель развития бурой ржавчины пшеницы основана на решении системы дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом (ДУЗА) и реализована в расчетной программе с применением комплекса DIFSUBDEL. Ее можно использовать при создании современных экспертных систем прогнозирования и диагностики болезней растений.

PHENOTYPIC EXPRESSION OF WHEAT RESISTANCE TO BROWN RUST: ELEMENTS AND MODELING

Kolesnikov L.E.¹, **Kolesnikov E.K.**², **Pavlyushin V.A.**³, **Chernov S.V.**², **Kolesnikova Yu.R.**⁴

¹Saint-Petersburg State Agrarian University,
196601, Sankt-Peterburg-Pushkin, Peterburgskoe sh., 2
E-mail: kleon9@yandex.ru

²Saint-Petersburg State University,
199034, Sankt-Peterburg, Universitetskaya naberezhnaya, 7/9
E-mail: e.kolesnikov@spbu.ru

³All-Russian Institute of Plant Protection,
Saint Petersburg, 196608, shosse Podbelskogo, 3

⁴Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR),
190000, Sankt-Peterburg, ul. Bol'shaya Morskaya, 42-44
E-mail: jusab@yandex.ru

The analysis of the wheat phenotypic variability of resistance to brown rust, the identification of factors, determining the pathogen development, the clarification of indicators for quantitative relationships assessing in the pathogen-host-environment system and the construction of the pathogenesis simulation model are presented in the work. The highest resistance to the disease was found on tall wheat cultivars characterized by a vertical (less than 15°), deviating (15... 45°) and horizontal (46... 90°) arrangement of the flag leaf, a strong waxy coating (9 score), leaves with a certain density (941.7 ± 63.8 trichomes per 1 cm²) and length (2.2 ± 0.1 mm) of downiness trichomes. The proposed system of meteoropathological prediction of brown rust development was based on the revealing of correlations between the number of pustules, the pustule area and meteorological factors (temperature, precipitation, relative humidity), solar activity and the identification of integral tendencies in their change on wheat cultivars with different resistance. The factor model describing the interrelations of the brown rust and pathogens of mixed leaf infection (yellow rust, powdery mildew, septoria) development on the Leningradskaya 6 cultivar, phytometric characteristics of crops, productivity, meteorological factors, solar activity was constructed. This multidimensional model allows for a systematic analysis of

*Работа выполнена в рамках прикладной научно-исследовательской работы по заданию Министерства сельского хозяйства по теме «Моделирование влияния агроэкологических факторов на развитие возбудителей болезней зерновых культур и определение возможности повышения урожайности мягкой пшеницы в изменяющихся условиях Северо-Запада Российской Федерации» и государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № 0662-2019-0006 «Поиск, поддержание жизнеспособности и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве».

changes in these indicators depending on environmental factors. In particular, it was revealed, that the development of brown rust intensified with an increase in the precipitation amount in June and depended on the sum of temperatures above 10 ° C in May, which was accompanied by an increase in the pustules number and the pustules area on the wheat flag leaves. Increased septoria and powdery mildew development on the wheat flag leaves led to a decrease in the development of brown rust. The imitation model of the wheat brown rust development is based on the solution of the system of differential equations with lagging argument (DUZA) and is implemented in a calculation program using the DIFSUBDEL complex. The model can be used to create modern expert systems for plant diseases forecasting and diagnosing.

Ключевые слова: мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.), болезни пшеницы, устойчивость пшеницы к болезням, фенотипическая изменчивость, моделирование патогенеза, метеопатологический прогноз

Key words: soft wheat (*Triticum aestivum* L.), wheat diseases, wheat diseases resistance, phenotypic variability, pathogenesis modeling, meteopathological prognosis

Общая концепция современного этапа развития сельского хозяйства предусматривает повышение его адаптивности и включение в процесс управления продуктивностью агробиocenозов экологических рычагов естественного регулирования их функционирования [1, 2]. Такой подход даёт возможность влиять на количественные взаимоотношения в системе патоген-хозяин-среда на популяционном, молекулярном и надорганизменном уровнях, в том числе с использованием методов и средств цифрового фитосанитарного мониторинга и дистанционного зондирования Земли [3, 4], а также разрабатывать научно-обоснованные системы защиты растений [5].

По данным многолетних исследований ВИЗР, к основным факторам, определяющим фитосанитарное состояние агроценозов зерновых культур, можно отнести метеорологические, организационно-хозяйственные, агротехнические. Кроме того, важнейшим элементом управления фитосанитарным состоянием посевов пшеницы служит эффективное использование приспособительных и средоулучшающих свойств культивируемых видов и сортов растений [6]. Все зональные системы интегрированной защиты растений базируются на возделывании сортов сельскохозяйственных культур, устойчивых к основным болезням, вредителям и другим стрессовым факторам [7, 8]. К сожалению, доля резистентных сортов в агроценозах не превышает 12...15% [9].

В процессе эволюции у растений выработались разнообразные защитные реакции на воздействие патогенов: видимые физические (фенотипические) и невидимые структурные изменения в органах и тканях [10]. На этой основе и с использованием выработанных походов к селекционной работе путем скрининга сортов различного происхождения, адаптированных к разным условиям среды и обладающих определенным набором полезных качеств для оптимального существования в каких-либо конкретных условиях, осуществляется искусственный отбор растений, в том числе по селекционно-ценным признакам. При этом особое внимание в различных отраслях сельскохозяйственной науки уделяется методологии создания идеальной модели сорта культуры, что дает возможность селекционеру более эффективно и экономично создавать сорта, максимально возможно приближающиеся к идеальным в конкретных условиях возделывания [11].

Изменения климата оказывают значительное влияние на распространение вредных организмов, их биоэкологические особенности, взаимоотношения в системах патоген-хозяин [12]. При этом на территории России в последние десятилетия наблюдается тенденция потепления, темпы которого намного превышают среднемировые [13].

Для оценки и прогнозирования воздействия природно-климатических факторов на патогенез растений, обусловленный развитием возбудителей болезней, применяют различные инструменты математического анализа [14]. Математические модели эпифитотий позволяют рассматривать взаимодействие патоген – хозяин как комплексный процесс, зависящий от большого количества факторов [15]. В ВИЗР разработку имитационных моделей осуществляли по двум направлениям: моделирование систем типа посев – вредный

объект и моделирование процессов, связанных с проведением защитных мероприятий [9, 16].

Болезни пшеницы, в том числе бурая (листовая) ржавчина *Puccinia triticina* Erikss., сильно ограничивают урожайность культуры. В годы эпифитотий снижение урожая пшеницы может достигать 20...30%. В цикле развития возбудителя выделяют несколько последовательно сменяющихся стадий спороношения. Особую опасность для пшеницы представляет уредостадия возбудителя, проявляющаяся на листьях в виде ржаво-бурых уредопустул с уредоспорами. Формирование большого числа уредопустул особенно на флаговых листьях пшеницы приводит к преждевременному их отмиранию, снижению фотосинтеза и уменьшению массы зерна [17].

В связи с изложенным, целью исследований – выявление природно-климатических факторов, определяющих интенсивность развития бурой ржавчины, и разработка системы метеопатологического прогноза для повышения урожайности пшеницы.

Методика. Работу проводили на кафедре защиты и карантина растений Санкт-Петербургского государственного аграрного университета, в лаборатории микробиологической защиты растений Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений, на математико-механическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета. Экспериментальные исследования выполняли в условиях опытного поля научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» ФГБНУ «ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова» (ВИР). Растительным материалом для исследования служила коллекция мягкой пшеницы, представленная для изучения отделом генетических ресурсов пшеницы ВИР.

Анализ влияния элементов фенотипической изменчивости сортов пшеницы на интенсивность развития бурой ржавчины пшеницы был проведен по следующим показателям: угол наклона флагового листа (2009–2010 гг., объем выборки – 468 образцов); плотность и длина волосков опушения, высота растений (2009–2020 гг., объем выборки – 701 образец), продуктивная и общая кустистость, окраска листьев, восковой налет (2009–2020 гг., объем выборки – 1955 образцов). Изучение корреляционных взаимосвязей между метеоусловиями, солнечной активностью и развитием бурой ржавчины пшеницы выполнено на 74-х сортах пшеницы на основе сведений за 1995–2012 гг. Многофакторная модель развития бурой ржавчины пшеницы, в том числе в смешанных инфекциях листьев на сорте Ленинградская 6, к-64900, была построена по данным за 2009–2020 гг.

В качестве основных характеристик патогенеза пшеницы, формируемого развитием возбудителя бурой ржавчины *Puccinia triticina* Erikss., рассматривали развитие болезни (R_0), число пустул (N_p), площадь пустулы (S_p), тип реакции (T_p). Учет развития возбудителей болезней листьев, сопутствующих бурой ржавчине, осуществляли по следующим показателям: желтой ржавчины (*Puccinia striiformis* West.) – развитие болезни, число и длина полос с пустулами, площадь пустул, тип реакции; мучнистой росы (*Blumeria graminis* Speer.) – развитие болезни, число и площадь пятен с налетом, тип реакции,

развитие болезни; септориоз (*Parastagonospora nodorum*; *Zymoseptoria tritici*) – развитие болезни. Характеристику фитопатологических показателей давали по результатам их определения на флаговых листьях пшеницы с использованием бинокляра МБС-9 и тринокуляра «Микромед» [18].

Данные о метеорологических условиях и солнечной активности, характеризующей среднегодовым общим числом пятен на Солнце, за 1995–2020 гг. были предоставлены отделом агрометеорологии ВИР и Королевской обсерваторией Бельгии [19], среднемесячные значения чисел Вольфа – ФГБНУ «Дальневосточное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» [20].

Для оценки продуктивности пшеницы использовали комплекс показателей: высота, см; площадь флагового листа, см²; длина колоса, см; число колосков в колосе, шт.; число зерен в колосе, шт.; масса зерен колоса, шт.; масса 1000 зерен, г; урожайность одного растения, г [21].

Характеристику ботанических особенностей растений (угол наклона флагового листа к стеблю, балл; восковой налет, балл; окраска листа, балл; опушенность листа, балл) определяли на основе методических указаний [22]. Оценка количества волосков опушения на 1 см² флагового листа проводили по результатам измерений в не менее чем в 10-и полях зрения микроскопа, при увеличении 56 \times . Кроме того, при аналогичном увеличении микроскопа с использованием объективного и окулярного микрометров определяли длину волосков опушения (мм). При ранжировании образцов пшеницы в порядке увеличения высоты растений использовали классификацию, предложенную Н.Э. Ионовой и др. [23].

С целью математической обработки фитопатологических и морфометрических характеристик мягкой пшеницы, а также оценки влияния на ее сорта природно-климатических факторов (с 1995 г.) в среде IBM SPSS была создана электронная база данных, содержащая сведения об изученных образцах. При расчетах использовали методы параметрической статистики на основе определения стандартных ошибок средних \pm SEM, 95 %-доверительных интервалов и непараметрической статистики – определение коэффициента корреляции Спирмена.

При анализе сопряженности интенсивности развития, числа и площади пустил бурой ржавчины пшеницы с метеорологическими условиями и солнечной активностью за период 1995–2012 гг. были созданы и проанализированы корреляционные матрицы, полученные по данным учета развития болезни на 74-х сортах мягкой пшеницы. В дальнейшем коэффициенты корреляции ранжировали, после чего был рассчитан относительный показатель – доля коэффициентов корреляции Спирмена, как отношение числа отрицательных или положительных коэффициентов, характеризующих метеобусловленность патогенеза по месяцам текущего (январь–август) и предшествующего (сентябрь–декабрь) года проведения фитосанитарного мониторинга к числу анализируемых сортов.

Метод факторного анализа, позволяющий в упрощенном виде анализировать причинно-следственные связи между перечисленными показателями с использованием гипотетически непосредственно не измеряемых, скрытых (латентных) переменных – факторов, использовали для определения взаимосвязей между 42-мя показателями, характеризующими развитие возбудителей болезней листьев пшеницы, элементы структуры её урожайности, метеорологические условия и солнечную активность. При построении факторной модели, представленной в работе, было выявлено пять факторов (F1...F5), описывающих линейные статистические связи (корреляции) между указанными ранее показателями. Выявленные факторы включали группы показателей, коррелирующих между собой больше, чем с показателями, входящими в другой фактор. Алгоритм факторного анализа был основан на последовательном выделении факторов, в том числе F1,

объясняющего наибольшую долю дисперсии показателей, F2, объясняющего меньшую, вторую после первого латентного фактора часть дисперсии, и так далее. Для отбора минимального числа факторов, вносящих наибольший вклад в дисперсию переменных показателей использовали метод главных компонент, а для получения более простой структуры факторов и их лучшего разделения путем уменьшения числа показателей, связанных с каждым фактором, – метод варимакс нормализованное вращение.

Результаты и обсуждение. Анализ изменения интенсивности развития бурой ржавчины пшеницы в зависимости от угла наклона флагового листа свидетельствует (рис. 1), что минимальное число пустил характерно в большей степени для сортов, отличающихся вертикальным расположением флагового листа (наклон <15 $^{\circ}$), максимальное – при его понижении (наклон >135 $^{\circ}$).

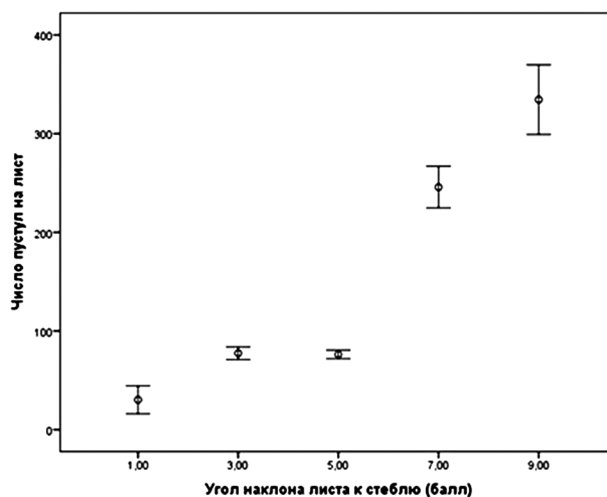


Рис. 1. Зависимость числа пустил бурой ржавчины на флаговом листе от угла наклона к стеблю, балл (2009–2010 гг.): 1 – вертикальное (наклон <15 $^{\circ}$); 3 – отклоняющееся (15...45 $^{\circ}$); 5 – горизонтальное (46...90 $^{\circ}$); 7 – поникающее (91...135 $^{\circ}$); 9 – поникшее (наклон >135 $^{\circ}$).

Исследование влияния опушения флаговых листьев пшеницы на особенности развития бурой ржавчины показало, что в группе сортов, не пораженных болезнью, доля образцов с отсутствием опушения составляет 37,3 %, в группе с симптомами развития болезни – 22,7 %. Выявлена тенденция увеличения поражения пшеницы болезнью по мере повышения плотности опушения флагового листа, которое может способствовать лучшему удержанию спор на поверхности, а также созданию особых микроклиматических условий для их дальнейшего развития и внедрения (рис. 2). Наименьшее поражение болезнью выявлено у образцов пшеницы с числом волосков опушения (трихом) 941,7 \pm 63,8 шт. на 1 см² листа, а самое высокое – при 1451,4 \pm 124,7 шт./на 1 см² листа.

Установлена тенденция снижения развития бурой ржавчины пшеницы с увеличением длины волосков опушения (рис. 3), что, возможно, связано с затрудненным доступом спор к тканям листа. Наибольшая интенсивность развития бурой ржавчины ($R_0 = 64,8 \pm 3,1$) была выявлена у группы образцов с минимальной длиной волосков опушения – 0,6 \pm 0,3 мм. Самой высокой устойчивостью к болезни отличались генотипы, характеризующиеся наибольшей длиной волосков опушения – 2,2 \pm 0,1 мм. У образцов пшеницы, флаговые листья которых имели сильный восковой налет, отмечали существенно меньшее число пустил бурой ржавчины ($N_n = 149,2 \pm 19,0$; $R_0 = 17,1 \pm 1,8$ %), по сравнению с генотипами, имеющими листья со слабым восковым налетом ($N_n = 248,9 \pm 26,2$; $R_0 = 23,4 \pm 1,7$ %).

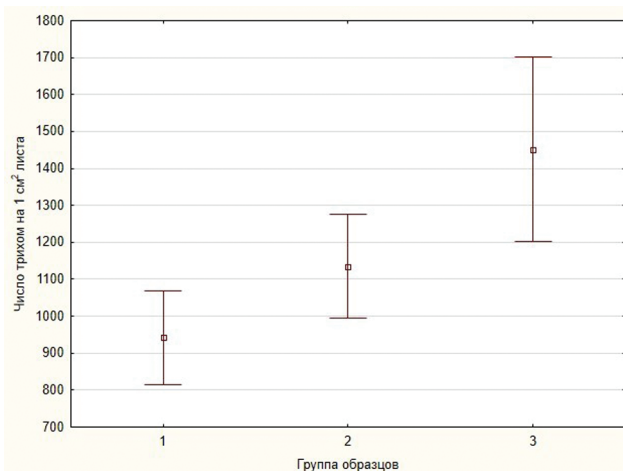


Рис. 2. Зависимость развития бурой ржавчины от плотности опушения листового листа пшеницы (2009–2020 гг.): 1 группа – $R_0 = 1,7 \pm 0,1$; $N_n = 11,7 \pm 19,0$; $S_n = 0,03833 \pm 0,00718$ мм²; $T_0 = 1,2 \pm 0,8$; 2 группа – $R_0 = 12,3 \pm 0,3$; $N_n = 121,8 \pm 11,3$; $S_n = 0,07688 \pm 0,01396$ мм²; $T_0 = 2,3 \pm 1,1$; 3 группа – $R_0 = 39,3 \pm 1,5$; $N_n = 406,3 \pm 34,8$; $S_n = 0,08376 \pm 0,00689$ мм²; $T_0 = 3,3 \pm 0,9$.

За 2009–2020 гг. выявлено существенное снижение числа пустул бурой ржавчины на высокорослых образцах пшеницы ($N_n = 127,7 \pm 26,2$ шт.), по сравнению с низкорослыми ($N_n = 265,1 \pm 45,6$ шт.) и среднерослыми ($N_n = 265,0 \pm 43,6$ шт.). Кроме того, степень поражения пшеницы заболеванием повышалась с ростом общей кустистости. Наибольшее число пустул ($N_n = 206,9 \pm 39,6$ шт.), развитие болезни ($R_0 = 14,4 \pm 1,6\%$) и площадь одной пустулы ($S_n = 0,06120 \pm 0,00290$ – тип реакции $3,4 \pm 0,1$) были выявлены при общей кустистости 8 и 9 стеблей на растении. Наименьшее число пустул возбудителя отмечено на листьях не раскустившихся растений (1 стебель): $N_n = 52,0 \pm 3,7$ шт., что соответствует $R_0 = 8,4 \pm 0,4\%$.

Самое слабое развитие болезни (по числу и площади пустул бурой ржавчины) отмечено на образцах со светло-зелеными листьями ($R_0 = 5,7 \pm 1,0$; $N_n = 28,1 \pm 5,4$; $S_n = 0,03402 \pm 0,00283$ мм²; $T_0 = 1,6 \pm 0,1$). Наибольшим оно было на образцах с серо-зелеными листьями ($R_0 = 16,6 \pm 0,9$; $N_n = 130,3 \pm 1,0$; $S_n = 0,05273 \pm 0,00220$ мм²; $T_0 = 2,4 \pm 0,1$).

В результате многолетних исследований (1995–2012 гг.) выявлены наиболее значимые факторы, способствующие усилению или снижению интенсивности развития болезней растений и разработаны соответствующие статистические модели. На усиление средней интенсивности развития бурой ржавчины пшеницы в июле–августе, характеризуемой числом пустул на флаговых листьях, оказывало влияние повышение температуры и относительной влажности в мае. Это было отмечено соответственно на 81,1 % и 66,2 % образцов пшеницы (табл. 1). Кроме того, для 67,6 % образцов с повышением температуры в мае отмечен рост площади пустулы микромицета. Такую картину можно объяснить тем, что со второй декады мая начинается нарастание инфекционного потенциала уредостадии возбудителя бурой ржавчины на озимой пшенице и дикорастущих злаковых травах от сохранившегося в них уредомицелия. Теплая и влажная погода способствует более быстрому формированию генераций уредоспор, что определяет нарастание естественного инфекционного фона и в дальнейшем способствует более интенсивному развитию болезни на мягкой пшенице. Рост температуры и снижение числа выпавших осадков в июне, напротив, сдерживали развитие болезни, что отражали выявленные обратные и прямые корреляционные связи между указанными метеопозаказателями и развитием болезни, характеризуемым числом пустул.

Выявлено преобладание доли положительных коэффициентов корреляции между числом пустул бурой ржавчины на флаговых листьях большинства сортов в июле–августе и среднемесячной температурой предшествующего периода: сентябрь – декабрь прошлого года и январь–май текущего года. Теплая погода осенью, зимой и весной усиливает развитие и накопление инфекционного потенциала популяции гриба на озимых зерновых культурах и дикорастущих злаках. Низкие температуры зимой, напротив, могут сопровождаться полной гибелью зимующей инфекции патогена.

Критическими параметрами, определяющими сохранение и нарастание инфекционного потенциала бурой ржавчины пшеницы на озимой пшенице и дикорастущих злаках были условия увлажнения – повышенная сумма осадков (ноябрь, февраль – апрель, июнь) и относительная влажность воздуха (январь, март, май), что способствовало, в дальнейшем, усилению поражения болезнью мягкой пшеницы.

Среднемесячная температура летнего периода не оказывала существенного влияния на площадь пустулы возбудителя. При этом снижение суммы выпавших осадков в июне–августе повышало восприимчивость растений к болезни, что характеризовалось увеличением площади пустулы микромицета.

Методом множественной регрессии построена модель, отражающая зависимость изменения числа пустул бурой ржавчины пшеницы N_n от температуры ($T_{май}$), относительной влажности ($V_{май}$) и суммы осадков ($M_{май}$), зарегистрированных в мае на сорте Frassineto, к-40269, которая имеет следующий вид:

$$N_n = -5594,45 + 193,03 T_{май} + 47,15 V_{май} - 0,99 M_{май}$$

(коэффициент детерминации $R^2 = 0,74$).

Выявлено преобладание обратных корреляционных связей между числом пустул возбудителя бурой ржавчины пшеницы и среднемесячным числом пятен на Солнце (табл. 2), что свидетельствует о возможном усилении интенсивности развития болезни с уменьшением числа пятен на Солнце. В отношении значений площади пустулы тенденции были разнонаправленными.

По результатам оценки взаимосвязи между показателями развития бурой ржавчины и других возбудителей болезней листьев с показателями структуры урожая пшеницы сорта Ленинградская 6, к-64900 и метеорологическими условиями

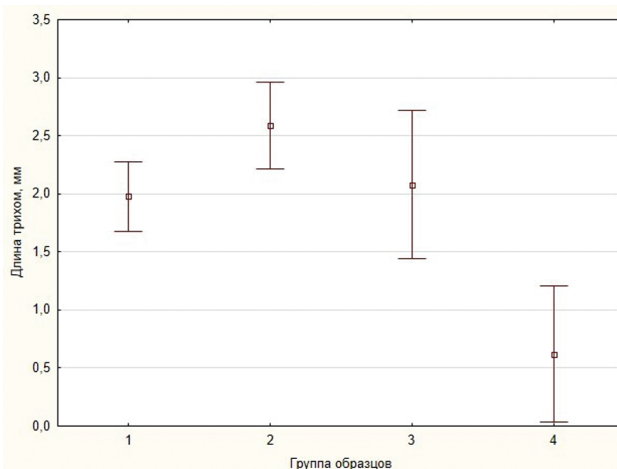


Рис. 3. Зависимость развития бурой ржавчины от длины трихом опушения листового листа пшеницы (2009–2020 гг.): 1 группа – $R_0 = 4,7 \pm 0,2$; $N_n = 43,5 \pm 5,1$; $S_n = 0,04807 \pm 0,00497$ мм²; $T_0 = 1,6 \pm 0,1$; 2 группа – $R_0 = 19,3 \pm 0,3$; $N_n = 188,9 \pm 23,7$; $S_n = 0,11055 \pm 0,04442$ мм²; $T_0 = 2,6 \pm 0,1$; 3 группа – $R_0 = 33,4 \pm 0,7$; $N_n = 327,1 \pm 29,2$; $S_n = 0,08246 \pm 0,00801$ мм²; $T_0 = 3,2 \pm 0,1$; 4 группа – $R_0 = 64,8 \pm 3,1$; $N_n = 753,6 \pm 105,0$; $S_n = 0,08942 \pm 0,01210$ мм²; $T_0 = 3,9 \pm 0,1$.

Табл. 1. Корреляционные взаимосвязи между метеоусловиями периодов фитосанитарного мониторинга и развитием бурой ржавчины на 74-х сортах мягкой пшеницы (1995–2012 гг.)

Доля коэффициентов корреляции, %	Данные текущего периода проведения учетов								Данные предшествующего периода проведения учетов			
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
ТЕМПЕРАТУРА (°C)												
Число пустул на лист, шт.												
Положительные	56,8	70,3	54,1	70,3	81,1	29,7	43,2	41,9	78,4	66,2	75,7	83,8
Отрицательные	39,2	28,4	43,2	27,0	18,9	70,3	55,4	56,8	21,6	33,8	23,0	12,2
Площадь пустулы, мм ²												
Положительные	45,9	48,6	50,0	41,9	67,6	52,7	43,2	58,1	50,0	48,6	36,5	28,4
Отрицательные	47,3	43,2	41,9	50,0	27,0	43,2	50,0	36,5	41,9	39,2	59,5	66,2
СУММА ОСАДКОВ (мм)												
Число пустул на лист												
Положительные	27,0	79,7	86,5	67,6	16,2	90,5	75,7	58,1	45,9	12,2	98,6	39,2
Отрицательные	70,3	20,3	12,2	29,7	81,1	6,8	21,6	41,9	52,7	86,5	1,4	58,1
Площадь пустулы, мм ²												
Положительные	51,4	41,9	31,1	44,6	45,9	27,0	27,0	39,2	52,7	36,5	51,4	45,9
Отрицательные	43,2	51,4	56,8	48,6	47,3	66,2	64,9	56,8	39,2	56,8	37,8	45,9
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ (%)												
Число пустул на лист												
Положительные	70,3	20,3	77,0	14,9	66,2	32,4	31,1	9,5	10,8	9,5	14,9	58,1
Отрицательные	25,7	78,4	21,6	82,4	32,4	63,5	66,2	89,2	87,8	90,5	85,1	39,2
Площадь пустулы, мм ²												
Положительные	37,8	52,7	37,8	45,9	47,3	52,7	32,4	37,8	31,1	64,9	55,4	44,6
Отрицательные	54,1	40,5	55,4	48,6	43,2	41,9	56,8	55,4	60,8	27,0	37,8	48,6

за 2009–2020 гг. (табл. 3) методом главных компонент факторного анализа с использованием Варимакс-процедуры вращения осей построена факторная модель, которая объясняет 81,2 % общей дисперсии измерений показателей. Первый фактор (F₁) объясняет 33,3 % общей дисперсии переменных показателей, второй (F₂) – 17,3 %, третий (F₃) – 13,5 %, четвертый (F₄) – 9,7 %, пятый (F₅) – 7,4 %

Зависимости между отдельными показателями развития бурой ржавчины пшеницы и факторами, влияющими на патогенез, описаны в F₃. Развитие болезни, число и площадь пустул снижались с возрастом поражения листьев пшеницы мучнистой росой и септориозом. Развитие болезни усиливалось с увеличением суммы температур выше 10 °C в мае и суммы осадков в июне.

В F₁ отмечено усиление развития желтой ржавчины с уменьшением суммы температур в августе и снижением солнечной активности (по числу пятен на солнце и индексу Вольфа). В F₅ показано увеличение урожайности пшеницы при уменьшении площади пятен с налетом мучнистой росы и с ростом суммы осадков в мае и суммы температур в июне.

С использованием имеющихся литературных данных об особенностях развития возбудителя бурой ржавчины пшеницы [26] сформулирована механистическая математическая модель, описывающая динамику переменных состояния

фитопатогена в весенне-летний период. При построении модели мы исходили из предположения о том, что в начале вегетации в воздухе имеется определенный запас инфекции. Такая ситуация характерна для многих зерносеющих районов, в которые уредоспоры ежегодно заносятся ветром. Сформулированная модель представляет собой систему из 5 нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка с запаздывающим аргументом (ДУЗА), каждым из которых задается скорость изменения соответствующей переменной состояния возбудителя бурой ржавчины:

$$\frac{dx_{oc}}{dt} = k_{c,oc}x_c(t) - d_{oc}x_{oc}(t) - k_{oc,oc}x_{oc}(t) \quad (1)$$

$$\frac{dx_{oc}}{dt} = k_{oc,oc}x_{oc}(t) - d_{oc}x_{oc}(t) - k_{oc,n}x_{oc}(t - \tau_L) \quad (2)$$

$$\frac{dx_n}{dt} = k_{oc,n}x_{oc}(t - \tau_L) - (d_n^e + d_n^i)x_n(t) \quad (3)$$

$$\frac{dx_c}{dt} = k_{n,c}x_n(t) - d_cx_c(t) - k_{c,oc}x_c(t) \quad (4)$$

$$\frac{dx_n}{dt} = x_n(t - \tau_i) + (d_n^e + d_n^i)x_n(t) \quad (5)$$

Табл. 2. Корреляционные взаимосвязи между солнечной активностью (по числу пятен на Солнце) и развитием бурой ржавчины на 74-х сортах мягкой пшеницы (1995–2012 гг.)

Доля коэффициентов корреляции, %	Месяц							
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август
Число пустул на лист								
Положительные	37,8	41,9	40,5	23,0	36,5	40,5	35,1	36,5
Отрицательные	60,8	54,1	55,4	74,3	59,5	58,1	62,2	60,8
Площадь пустулы, мм ²								
Положительные	51,4	41,9	37,8	48,6	50,0	39,2	50,0	47,3
Отрицательные	43,2	50,0	54,1	45,9	43,2	52,7	44,6	47,3

Табл. 3. Факторный анализ урожайности пшеницы, развития болезней, метеорологических условий и солнечной активности

Показатель	Факторные нагрузки				
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
Высота, см	-0,16	0,89	0,05	0,28	0,13
Площадь флагового листа, см ²	0,39	0,40	0,13	0,67	-0,01
Длина колоса, см	0,07	0,00	0,14	0,65	0,55
Число колосков в колосе, шт.	0,07	0,11	-0,04	0,39	0,48
Число зерен в колосе, шт.	0,08	-0,41	-0,10	0,00	0,81
Масса зерен колоса, шт.	-0,42	-0,59	-0,14	0,11	0,57
Масса 1000 зерен, г	-0,41	-0,64	-0,25	0,07	0,20
Урожайность одного растения, г	0,07	-0,05	0,38	-0,06	0,84
Сумма температур выше 10 °С (май, с 11 числа), °С	0,70	0,15	0,58	0,05	-0,07
Сумма осадков (май, с 11 числа), °С	0,02	-0,24	0,22	0,09	0,86
Сумма температур (июнь), °С	0,31	0,13	-0,12	0,06	0,74
Сумма осадков (июнь), °С	-0,06	0,29	0,73	-0,53	-0,05
Сумма температур (июль), °С	0,68	0,24	0,26	0,44	-0,24
Сумма осадков (июль), °С	-0,08	0,09	0,17	-0,92	-0,06
Сумма температур (август), °С	0,84	0,20	0,03	-0,14	0,08
Сумма осадков (август), °С	0,10	0,24	0,15	-0,90	-0,10
Относительная влажность (май), %	0,56	0,48	0,21	0,33	-0,25
Относительная влажность (июнь), %	0,31	0,71	-0,06	0,29	-0,36
Относительная влажность (июль), %	0,21	0,68	-0,42	-0,19	-0,15
Относительная влажность (август), %	0,13	0,90	-0,08	0,07	-0,05
ГТК (июль)	-0,23	0,79	0,01	-0,46	-0,08
ГТК (август)	0,11	0,79	0,17	-0,44	0,09
Развитие бурой ржавчины, %	-0,11	-0,05	0,84	0,08	-0,04
Число пустул бурой ржавчины, шт.	0,10	-0,06	0,82	-0,05	0,30
Площадь пустулы бурой ржавчины, мм ²	-0,03	0,14	0,85	0,00	0,06
Развитие желтой ржавчины, %	-0,92	0,21	-0,06	0,14	0,04
Число пустул желтой ржавчины, шт.	-0,95	0,08	-0,01	0,11	0,11
Площадь пустулы желтой ржавчины, мм ²	-0,80	-0,22	0,31	0,28	-0,08
Число пустул желтой ржавчины в полосе, шт.	-0,98	-0,03	-0,04	-0,06	0,04
Число полос желтой ржавчины, шт.	-0,97	0,10	-0,05	-0,05	0,07
Длина полосы желтой ржавчины, мм	-0,96	0,09	-0,03	-0,17	-0,09
Развитие септориоза, %	0,16	0,16	-0,51	0,36	-0,23
Развитие мучнистой росы, %	-0,50	-0,12	-0,70	0,21	-0,13
Число пятен мучнистой росы	-0,30	0,08	-0,72	0,20	-0,17
Площадь пятен мучнистой росы, мм ²	-0,36	0,03	-0,49	0,35	-0,72
Число пятен на Солнце (среднее за год), шт.	0,86	0,20	0,04	0,25	0,37
Число пятен на Солнце (в июле), шт.	0,82	0,23	0,01	0,28	0,37
Число пятен на Солнце (в августе), шт.	0,88	0,23	0,09	0,14	0,33
Число Вольфа (июль), балл	0,81	0,22	0,03	0,29	0,38
Число Вольфа (август), балл	0,88	0,23	0,10	0,16	0,35

где x – число спор в воздухе над единицей площади листовой поверхности; x_{oc} – число осевших спор, x_{ac} – число спор, проросших на листовой поверхности («внедрившихся» спор); x_n – число пустул, x_n – число некрозов. Указанные показатели (так называемые переменные состояния патогена в уредостадии) характеризуют патогенез в текущий момент времени, а их совокупность ($x_c, x_{oc}, x_{ac}, x_n, x_n$) может быть рассмотрена как вектор состояния патогена в уредостадии в пространстве переменных состояния.

В уравнениях (1)–(5): $k_{c,oc}$ – коэффициент оседания спор; $k_{oc,ac}$ – коэффициент внедрения осевших спор; $k_{n,c}$ – коэффициент, характеризующий скорость образования спор пустулами; $d_{n,oc}^{oc}$ – коэффициент нежизнеспособности осевших спор; d_n^{oc} – коэффициент отмирания пустул, обусловленный воздействием внешних факторов; d_n^i – коэффициент отмирания пустул, обусловленный их естественным отмиранием; d_c – коэффициент гибели спор в воздухе.

Уравнение (1) описывает изменение количества спор, оседающих на единицу площади листовой поверхности. Первое слагаемое в его правой части характеризует процесс оседания спор из воздуха на листовую поверхность. Скорость этого процесса определяет коэффициент оседания спор $k_{c,oc}$, величину которого на практике можно определить экспериментальным путем. Для этого примем, что за время Δt на единицу площади листовой поверхности оседает ΔN_{oc}^0 спор. Обозначим через N число спор в столбе воздуха над участком листовой поверхности единичной площади. Тогда коэффициент оседания спор $k_{c,oc}$ может быть найден по формуле:

$$k_{c,oc} = \frac{\Delta N_{oc}^0}{\Delta t N} \quad (6)$$

Предположим, что высотный ход концентрации $n(h)$ уредоспор в атмосфере над рассматриваемым участком поверхности имеет экспоненциальный характер, то есть:

$$n(h) = n^0 \exp\left\{-\frac{h}{H}\right\}, \quad (7)$$

где n^0 – концентрация уредоспор в столбе воздуха непосредственно у поверхности листа.

Используя (7) легко показать, что величины N , n^0 и H связаны соотношением:

$$N = n^0 H. \quad (8)$$

При проведении полевых исследований величины n^0 и H , а соответственно и N , могут быть найдены на основе результатов измерений числа уредоспор, оседающих на поверхности разновысотных детекторов. При этом величина n^0 у поверхности нижнего детектора может быть найдена по формуле:

$$n^0 = \frac{\Delta N_{oc}^0}{\bar{V} \Delta t}, \quad (9)$$

где \bar{V} – средняя скорость оседания уредоспор (для спор бурой ржавчины она равна 1,26 м/с [24]).

Величину H можно определить на основе результатов измерения числа спор ΔN_{oc}^0 и ΔN_{oc}^d , оседающих соответственно на поверхности нижнего и верхнего детекторов за время Δt .

В этом случае ее можно рассчитать по уравнению:

$$H = \frac{\Delta h_d}{\ln \frac{\Delta N_{oc}^0}{\Delta N_{oc}^d}}, \quad (10)$$

где Δh_d – разность высот верхнего и нижнего детекторов.

Подставляя полученное значение H в (8), а, затем, найденное значение N в (6), получим искомое значение коэффициента оседания спор $k_{oc,oc}$.

Второе слагаемое в (1) описывает процесс гибели осевших спор, который характеризуется коэффициентом их нежизнеспособности d_{oc} .

Будем считать коэффициент d_{oc} постоянным. Нетрудно убедиться, что величина, обратная d_{oc} :

$$T_{oc}^d = (d_{oc})^{-1} \quad (11)$$

имеет размерность времени и представляет собой характерное время гибели осевших спор.

Действительно, пусть, например, в (1), $k_{oc,oc} = 0$, $d_{oc} \neq 0$. Тогда, решая уравнение (1) при начальном условии $t=0$, $x_{oc} = x_{oc}^0$, получим соответствующий закон изменения числа осевших спор:

$$x_{oc} = x_{oc}^0 \exp\left(-\frac{t}{T_{oc}^d}\right). \quad (12)$$

Как видно из (12), T_{oc}^d равно промежутку времени, по истечении которого число осевших спор уменьшается в e раз, вследствие гибели.

Наконец, третье слагаемое в (1) характеризует убыль осевших спор, обусловленную их переходом в состояние «проросшие споры».

Уравнение (2) описывает следующую фазу развития патогена – прорастание осевших спор с формированием ростковой трубки, которая чаще всего через устьица проникает в ткани растения-хозяина. Слагаемые правой части этого уравнения учитывают 3 процесса в жизненном цикле гриба. Первое из них описывает переход осевших спор в состояние проросшие споры, которое характеризуется коэффициентом их прорастания и проникновения ростковых трубок в ткани растения $k_{oc,oc}$.

Коэффициент проникновения в ткани ростковых трубок осевших спор $k_{oc,oc}$ может быть представлен в виде:

$$k_{oc,oc} = k_{oc,oc}^0 \bar{P}(x_n), \quad (13)$$

где $k_{oc,oc}^0$ – коэффициент прорастания осевших спор на чистой листовой поверхности, а \bar{P} – вероятность попадания осевших спор на непораженный участок.

Коэффициент $k_{oc,oc}^0$ зависит от температуры T_g и влажности q_g воздуха [25]. Оптимальная температура для заражения растений бурой ржавчиной – 15...20 °С. В таких условиях необходимо, чтобы влага сохранялась на растениях не менее 4...5 ч. С повышением, равно как и с понижением, температуры скорость развития инфекции замедляется. При температуре +5...6 °С для заражения необходимо, чтобы растения оставались влажными в течение 10...12 ч, а при температуре ниже +5 °С заражения не происходит.

Вероятность \bar{P} в (11) зависит от числа некрозов x_n . Для ее вычисления введем в рассмотрение площадь s_n^0 одного некроза. При одном некрозе вероятность попадания осевшей споры на непораженную поверхность составляет $p_0 = 1 - s_n^0$ (при единичной площади рассматриваемого участка), а для x_n некрозов с законом равномерного распределения вероятность попадания на непораженный участок будет равна:

$$\bar{P} = (1 - s_n^0)^{x_n}. \quad (14)$$

$$k_{oc,oc} = k_{oc,oc}^0 (1 - s_n^0)^{x_n}. \quad (15)$$

Второе слагаемое в правой части (2) описывает процесс гибели ростковых трубок уредоспор, который характеризуется коэффициентом смертности d_{oc} , третье – преобразование числа проросших и давших ростковые трубки спор в пустулы через промежуток времени τ_L , называемый латентным периодом.

Известно, что продолжительность латентного периода τ_L – функция температуры воздуха. Согласно результатам исследований С.С. Санина [26], при среднесуточной температуре +20 °С новые уредопустулы проявляются через 4...5 дней, при +15 °С – через 8...9 дней, при +10 °С – только через 15...16 дней.

Уравнение (3) отражает процесс образования пустул на листовой поверхности. Первым слагаемым в его правой части задается скорость процесса формирования пустул из проросших спор, запускаемого через промежуток времени равный латентному периоду τ_L .

Второе слагаемое в правой части (3) характеризует скорость отмирания пустул после формирования спор, которая определяется коэффициентом отмирания d_n^i :

$$d_n^i = d_n^e + d_n^i, \quad (16)$$

где d_n^e – постоянный коэффициент отмирания пустул, обусловленный воздействием внешних факторов, d_n^i – постоянный коэффициент отмирания пустул, обусловленный естественным отмиранием.

Уравнение (4) описывает изменение количества спор в воздухе x_c над единицей площади листовой поверхности. Первое слагаемое в его правой части характеризует скорость увеличения числа спор над листовой поверхностью, обусловленную процессом споруляции, вызываемым образующимися пустулами. Она определяется коэффициентом $k_{n,c}$, характеризующим скорость процесса образования спор пустулами. Коэффициент $k_{n,c}$ связан с коэффициентом естественного отмирания пустул d_n^i соотношением:

$$k_{n,c} = N_c d_n^i, \quad (17)$$

где N_c – полное число спор, образуемое одной пустулой

Величину N_c в (17) можно определить из следующих соображений. Введем в рассмотрение площадь непораженной листовой поверхности, приходящуюся на одну пустулу:

$$s' = \frac{(1 - s_n^0)^{x_n}}{x_n}. \quad (18)$$

Обозначим через s_n^0 максимальную площадь пустулы, образующейся на листовой поверхности. При $s' > s_n^0$ пустулы будут достигать максимальной площади, которой соответствует максимальное число производимых спор N_c . В тоже время, при $s' < s_n^0$ средний размер пустул будет в s_n^0/s' раз меньше максимального, а число производимых ими спор составит соответственно:

$$N_c = N_0 \frac{s'}{s_0^n} = \frac{N_0(1-s_0^n)^{x_n}}{s_0^n x_n} \quad (19)$$

Таким образом, выражение для коэффициента $k_{n,c}$ в уравнении (4) имеет вид:

$$k_{n,c}(x_n, x_n) = \begin{cases} d_n^i N_0, & \frac{(1-s_0^n)^{x_n}}{s_0^n x_n} > 1 \\ d_n^i \frac{N_0(1-s_0^n)^{x_n}}{s_0^n x_n}, & \frac{(1-s_0^n)^{x_n}}{s_0^n x_n} \leq 1 \end{cases}$$

Второе слагаемое, в правой части уравнения (4) описывает убыль спор над листовой поверхностью, обусловленную их гибелью, третье – их оседанием на листовую поверхность.

Уравнение (5) характеризует процесс образования некрозов на листовой поверхности. Первое слагаемое в его правой части описывает процесс образования некрозов из-за естественного отмирания пустул по окончании инфекционного периода τ_i .

Второе слагаемое в правой части (5) характеризует образование некрозов в течение инфекционного периода из-за отмирания пустул, обусловленное воздействием внешних факторов с коэффициентом отмирания d_n^k и естественным отмиранием пустул с коэффициентом d_n^i .

С математической точки зрения сформулированная задача представляет собой задачу Коши для системы дифференциальных уравнений с запаздывающими аргументами (ДУЗА) вида:

$$y'(t) = f(t, y(t), y(t-\tau)), \quad t \geq t_0, \quad (20)$$

$$y(t) = \psi(t), \quad t \in [t_0 - \tau, t_0]$$

Для того чтобы найти решение $y(t)$ при $t \geq t_0$, требуется задать начальные значения $\psi(t)$ на интервале: $t \in [t_0 - \tau, t_0]$. Наиболее рациональный подход к численному решению системы (20) заключается в использовании метода шагов, то есть ее замене на систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) на каждом промежутке времени $t \in [t_0 + n\tau, t_0 + (n+1)\tau]$:

$$y'(t) = f(t, y(t), \tilde{y}(t-\tau)), \quad (21)$$

$$t \in [t_0 + n\tau, t_0 + (n+1)\tau],$$

где $n=0, 1, \dots, [T/\tau]+1$, где T – время моделирования. При этом предполагается, что $\tilde{y}(t-\tau)$ известно, так как эта величина вычисляется на промежутке $[t_0 + (n-1)\tau, t_0 + n\tau]$ путем интерполяции ранее полученного на этом промежутке решения или заданных начальных значений $\psi(t)$ на интервале $t \in [t_0 - \tau, t_0]$.

Заметим, что для численного решения системы дифференциальных уравнений используют различные алгоритмы [27]. При этом в нашей работе для решения системы уравнений (1)–(5) с запаздывающим аргументом был использован программный комплекс DIFSUBDEL, подробно описанный в работе [28].

Приведенная в работе имитационная модель развития бурой ржавчины пшеницы может использоваться при создании современных экспертных систем прогнозирования и диагностики болезней растений.

Разная интенсивность поражения сортов пшеницы болезнью, связанная, в том числе, с их морфометрическими особенностями, свидетельствует о необходимости применения адаптивного подхода к выбору агротехнических приемов возделывания и требует корректировки системы защитных мероприятий [29]. Особое внимание должно быть уделено

селекции болезнеустойчивых сортов, в частности, созданию генотипов с более широкими адаптационными возможностями [12].

Важнейшие факторы, влияющие на проявление фенотипической изменчивости пшеницы по устойчивости к болезни, – комплекс метеорологических факторов (температура, количество осадков, влажность воздуха), а также солнечная активность [30]. При этом данные по влиянию солнечной активности на развитие болезней сельскохозяйственных культур в разных литературных источниках достаточно противоречивы. Полученные в ходе наших исследований сведения об усилении интенсивности развития бурой ржавчины с уменьшением числа пятен на Солнце согласуются с данными, приведенными в работе [31], где указано, что эпифитотии бурой ржавчины возникали в основном в годы слабой, реже средней солнечной активности.

В результате построенной факторной модели патогенеза по данным 2009–2020 гг. отмечено, что развитие бурой ржавчины в наибольшей степени усиливалось с ростом суммы температур выше 10°C в мае и суммы осадков в июне, что совпадает с исследованиями, проведенными за период 1995–2012 гг. Выявленная зависимость согласуется с данными, представленными в работе В.В. Чекмарева (2016) [30].

В прогнозировании развития болезни сельскохозяйственных культур, в том числе, пшеницы большое значение имеет широкомасштабный мониторинг посевов [3]. При его проведении в качестве уточняющих характеристик патогенеза, формируемого при поражении пшеницы бурой ржавчиной, рекомендуется использовать помимо общепринятого – условного развития болезни, такие показатели, как число пустул и площадь пустулы, рассчитываемой по формуле площади эллипса. Следует отметить, что дифференция сортов пшеницы по устойчивости к болезни основана на определении типа реакции, а определение размера пустулы – важный критерий этой шкалы.

Таким образом, согласно результатам проведенных исследований наибольшей устойчивостью к бурой ржавчине обладали высокорослые (более 98 см) сорта пшеницы, характеризующиеся вертикальным, отклоняющимся и горизонтальным расположением флагового листа, сильным восковым налетом, листьями с плотностью опущения – 941,7±63,8 волосков на 1 см² листа и с длиной волосков более 1,5 мм. Выявлены обратные корреляционные связи между развитием болезни и общей кустистостью, окраской флаговых листьев пшеницы. В частности, наименьшее развитие заболевания зарегистрировано на образцах, характеризующихся светло-зелеными листьями.

Разработанная система метеопатологического прогноза бурой ржавчины пшеницы, основанная на выявлении множества корреляционных зависимостей между показателями интенсивности поражения болезнью, метеорологическими факторами, солнечной активностью и выявления, в дальнейшем, доминирующих тенденций в их изменении. В результате ее использования на примере 2009–2020 гг. отмечено, что развитие бурой ржавчины в наибольшей степени усиливалось с ростом суммы температур выше 10°C в мае и суммы осадков в июне. Развитие бурой ржавчины пшеницы снижалось при усилении пораженности посевов мучнистой росой.

Результаты исследований могут представлять определенный интерес для отраслей зерновой промышленности, в том числе – сельскохозяйственных предприятий, специализирующихся на возделывании пшеницы на продовольственные, фуражные и семенные цели, для селекции и семеноводства, при разработке механизмов ведения органического земледелия. Построенные математические модели могут быть использованы для разработки информационных систем фитосанитарной экспертизы агроценозов, прогноза и поддержки принятия решений в области защиты растений.

Литература.

1. *Managed grain production as an element of rational nature management, ensuring the production of economically valuable grain with a minimum level of hidden damage / M.V. Arkhipov, Y. Tyukalov, T. Danilova, et al. // Agriculture digitalization and organic production. «Smart Innovation, Systems and Technologies».* Singapore, Springer. 2022. P. 103–112. doi: 10.1007/978-981-16-3349-2_9
2. Фитосанитарная дестабилизация агроэкосистем / В.А. Павлюшин, Н.А. Вилкова, Г.И. Сухорученко и др. СПб.: «Родные просторы», 2013. 184 с.
3. Павлюшин В.А., Лысов А.К. Фитосанитарная безопасность агроэкосистем и дистанционный фитосанитарный мониторинг в защите растений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2019. Т.16. №3. С. 69–78.
4. Оленин О.А., Зудилин С.Н., Осоргин Ю.В. Цифровой мониторинг показателей агроэкосистем на основе космических и беспилотных технологий // *Пермский аграрный вестник.* № 3 (27). 2019. С.53–61
5. Совершенствование ассортимента средств борьбы с вредителями растений в XXI веке / В.И. Долженко, Г.И. Сухорученко, Л.А. Буркова и др. // *Агрохимия.* № 1. 2021. С. 31–40
6. Жученко А.А. Адаптивное растениеводство. Эколого-генетические основы. Теория и практика. М.: Агрорус, 2008, 2009. Т. 1. 814 с., Т.2. 1098 с. Т.3. 958 с.
7. Определение генов устойчивости к бурой ржавчине у сортов озимой мягкой пшеницы с использованием традиционных и современных методов исследований / Н.В. Шлишкин, Т.Г. Дерова, Е.И. Гулятьева и др. // *Зерновое хозяйство России.* № 5(59). 2018. С.63–67
8. Вилкова Н.А., Нефедова Л.И., Фролов А.Н. Иммуитет семенных растений и его фитосанитарное значение в агроэкосистемах // *Защита и карантин растений.* 2015. № 8. С. 3–9.
9. Принципы интегрированного подхода к решению проблем защиты растений / М.М. Левитин, В.И. Танский, Ю.И. Власов и др. // *Вестник защиты растений.* 1999. №1. С.44–50.
10. Чесноков Ю.В. Устойчивость растений к патогенам // *Сельскохозяйственная биология.* 2007. № 1. С.16–35.
11. Новоселов С.Н. Философия идеотипа сельскохозяйственных культур. I. Методология и методика // *Научный журнал КубГАУ.* №24(8). 2006. с.5–27.
12. Левитин М.М. Микроорганизмы в условиях глобального изменения климата // *Сельскохозяйственная биология.* 2015. Т. 50. №5. С. 641–647.
13. Сиптиц С.О., Романенко И.А., Евдокимова Н.Е. Модельные оценки влияния климата на урожайность зерновых и зернобобовых культур в регионах России // *Проблемы прогнозирования.* 2021. № 2. С.75–86.
14. Бронских М.Д. Коррелятивная связь между параметрами климата и уровнем развития болезней озимой пшеницы // *Аграрная наука.* № 51. 2019. С.148–153
15. Системный подход к моделированию развития листовых грибных инфекций пшеницы / С.В. Николаев, У.С. Зубаирова, Е.С. Сколотнева и др. // *Вавиловский журнал генетики и селекции.* 2019. № 23(1). С.100–109. doi: 10.18699/VJ19.468
16. Жаров В.Р., Васильев С.В., Семенова Н.Н. Методы математического моделирования и вычислительная техника в обеспечении исследований ВИЗР // *70 лет ВИЗР Ретроспектива исследований (методология, теория, практика) 1929–1999.* СПб.: Инновационный центр защиты растений ВИЗР, 1999. С.88–98.
17. Расширение генетического разнообразия сортов яровой мягкой пшеницы по устойчивости к бурой ржавчине (*Puccinia triticina* Eriks.) в Нижнем Поволжье / Е.И. Гулятьева, С.Н. Сибикеев, А.Е. Дружинин и др. // *Сельскохозяйственная биология.* 2020. Т. 55. № 1. С. 27–44. doi: 10.15389/agrobiology.2020.1.27rus
18. Estimation of the Efficiency of the Combined Application of Chitosan and Microbial Antagonists for the Protection of Spring Soft Wheat from Diseases by Spectrometric Analysis / L.E. Kolesnikov, I.I. Novikova, V.G. Surin, et al. // *Applied Biochemistry and Microbiology.* 2018. 54(5). P. 546–552.
19. SILSO, World Data Center – Sunspot Number and Long-term Solar Observations, Royal Observatory of Belgium, on-line Sunspot Number catalogue. URL: [http://www.sidc.be/SILSO/year\(s\)-of-data](http://www.sidc.be/SILSO/year(s)-of-data) (дата обращения: 21.10.21)
20. «Геофизика»: Среднемесячные числа Вольфа / ФГБУ «Дальневосточное УГМС». URL: <http://meteo-dv.ru/geospace/averageMonthW> (дата обращения: 17.12.21)
21. Повышение урожайности зерновых культур и снижение вредоносности возбудителей болезней при использовании акрилового гидрогеля и белкового стимулятора роста / Л.Е. Колесников, М.В. Успенская, М.И. Кременевская и др. // *Российская сельскохозяйственная наука.* 2021. № 3. С.33–40.
22. Пополнение, сохранение в живом виде и изучение мировой коллекции пшеницы, эгилопса и тритикале: методические указания / А.Ф. Мережко, Р.А. Удачин, В.Е. Зуев и др. СПб.: ВИР, 1999. С. 32–35.
23. Роль отдельных органов в продукционном процессе у растений яровой пшеницы разного эколого-географического происхождения / Н.Э. Ионова, Л.П. Хохлова, Р.Н. Валдулина и др. // *Сельскохозяйственная биология.* 2009. № 1. С. 60–67.
24. Грегори П. Распространение фитопатогенных микроорганизмов по воздуху // *Сельское хозяйство за рубежом. Растениеводство.* 1964. №2. С. 53–58.
25. Санин С.С. Проблемы фитосанитарии России на современном этапе // *Известия тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2016. № 6. С. 45–55
26. Санин С.С. Защита пшеницы от бурой ржавчины // *Защита и карантин растений.* 2007. № 11. С. 58.
27. Rihan F.A. *Delay Differential Equations and Applications to Biology.* Department of Mathematical Sciences United Arab Emirates University. Al-Ain, Abu Dhabi, United Arab Emirates. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2021. 286 p. doi: 10.1007/978-981-16-0626-7
28. Эффективная программная реализация численных методов решения жестких систем дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом / Д.А. Желтков, Р.М. Третьякова, В.В. Желткова и др. // *Вычислительные методы и программирование.* 2020. Т. 21. С. 78–86.
29. Исходный материал озимой пшеницы для селекции устойчивых к стрессовым факторам сортов / С.К. Темирбекова, И.М. Куликов, Ю.В. Афанасьева и др. // *Вестник российской сельскохозяйственной науки.* № 1. 2021. С. 16–24
30. Чекмарев В.В. Новый подход к составлению формул прогноза болезней сельскохозяйственных культур (на примере ржавчинных заболеваний зерновых культур). Тамбов: Принт-сервис, 2016. 186 с.
31. Мединец О.Э. Экологические предпосылки эпифитотий бурой ржавчины пшеницы // *Защита и карантин растений.* 2014. № 7. С. 12–15.

Поступила в редакцию 28.11.2021
 После доработки 20.12.2021
 Принята к публикации 28.01.2022

Агропочвоведение и агроэкология

УДК 614.876:631/635:631.95:631.4

DOI: 10.31857/S2500262722010082

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ АГРОСФЕРЫ В РАЙОНАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А. В. Панов, доктор биологических наук, **В. К. Кузнецов**, доктор биологических наук, **П. Н. Цыгвинцев**, кандидат биологических наук, **Н. Н. Исамов**, кандидат биологических наук

*Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии,
249032, Калужская обл., Обнинск, Киевское ш., 109 км
E-mail: riar@mail.ru*

Контроль радиационной обстановки в сельском хозяйстве в зонах влияния атомных электростанций – важный фактор обеспечения безопасности населения, проживающего в районах расположения АЭС. Исследование проводили с целью анализа результатов многолетнего радиационно-экологического мониторинга аграрных экосистем в 30-км зонах вокруг Белоярской, Курской, Ленинградской и Ростовской атомных электростанций. В районах размещения обследованных АЭС отсутствуют участки сельскохозяйственных угодий, отнесенные к радиоактивно загрязненным (более 37 кБк/м² по ¹³⁷Cs). Средняя плотность загрязнения почв агроэкосистем ¹³⁷Cs варьирует в диапазоне 2...17 кБк/м², ⁹⁰Sr – в пределах 0,9...1,6 кБк/м². Более высокие уровни содержания ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в почвах лугопастбищных угодий в 1,1...1,6 раз выше, чем пашни, что обусловлено агротехническими мероприятиями на последних. В продукции растениеводства из 30-км зон влияния АЭС максимальные уровни удельной активности ¹³⁷Cs ниже действующих радиологических нормативов в 67...160 раз, ⁹⁰Sr – в 10...40 раз. В продукции животноводства максимальное содержание ¹³⁷Cs ниже санитарно-гигиенических стандартов в 330...440 раз, ⁹⁰Sr – в 60 раз. Отмечена важность мониторинга радиологически значимых ³H и ¹⁴C в пищевых продуктах в районах АЭС.

RADIATION SAFETY OF AGROSPHERE IN THE VICINITY OF NUCLEAR POWER PLANTS

Panov A.V., Kuznetsov V.K., Tsygvintsev P.N., Isamov N.N.

*Russian Institute of Radiology and Agroecology,
249032, Kaluzhskaya obl., Obninsk, Kievskoe sh., 109
E-mail: riar@mail.ru*

Radiation control in agriculture in the zones of influence of Nuclear Power Plants (NPPs) is an important factor in ensuring the safety of the population in the vicinity of NPPs. The aim of the work was to analyze the results of long-term radioecological monitoring of agrarian ecosystems in 30-km zones around the Beloyarsk, Kursk, Leningrad and Rostov NPPs. It is shown that in the vicinity of NPPs, there are no agricultural sites classified as radioactively contaminated (above 37 kBq/m² for ¹³⁷Cs). The average of contamination density of soil in agroecosystems with ¹³⁷Cs varies in the range of 2-17 kBq/m², ⁹⁰Sr in the range of 0.9-1.6 kBq/m². Higher levels of ¹³⁷Cs specific activity in agricultural soil are noted in the vicinity of Leningrad NPP and are determined by the Chernobyl fallout. Contamination density of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the soils of grassland is 1.1-1.6 times higher than that of arable land, which is due to agrotechnical measures on arable land. In crop production from 30-km zones of NPP influence, the maximum levels of specific activity of ¹³⁷Cs are 67-160 times, ⁹⁰Sr are 10-40 times lower than the radiological standards. In livestock products, the maximum content of ¹³⁷Cs are 330-440 times, ⁹⁰Sr is 60 times lower than the sanitary-hygienic standards. The importance of monitoring radiologically significant ³H and ¹⁴C in food products in the nuclear power plant areas was noted.

Ключевые слова: ядерная энергетика, аграрные экосистемы, радиационно-экологический мониторинг, радионуклиды, плотность загрязнения, сельскохозяйственная продукция, продукты питания

Key words: nuclear power, agrarian ecosystems, radioecological monitoring, radionuclides, contamination density, agricultural products, foodstuff

Ключевая проблема развития ядерной энергетики – обеспечение радиационной безопасности человека [1, 2]. Атомные электростанции в ядерном топливном цикле представляют наибольший риск с точки зрения облучения населения в случае возникновения на них аварийных ситуаций. Опыт ликвидации крупнейших радиационных аварий (на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима) показал длительный (десяtkи лет) характер радиологических последствий для окружающей среды, включая агросферу [3, 4, 5].

Многолетняя эксплуатация атомных электростанций в технологически штатном режиме не выявила их отрицательного воздействия на человека и биоту [6, 7, 8]. В то же время, даже в условиях нормальной работы, АЭС осуществляет в строго регламентированных количествах выбросы газоаэрозолей и сбросы технологических вод, содержащих радионуклиды [9]. Поэтому в международных документах по радиационной безопасности подчеркивается необходимость доказательства отсутствия негативных эффектов при эксплуатации атомных электростанций на человека [2]. Такое обоснование возможно только при организации и

ведении радиационно-экологического мониторинга в районах размещения АЭС на основе результатов многолетних наблюдений за выбросами и сбросами радионуклидов в атмосферу, водные и наземные экосистемы [10, 11, 12].

Для оценки динамики поступления в окружающую среду техногенных радиоизотопов от АЭС часто используют наземные (природные и аграрные) экосистемы, а объектом исследования служит почвенно-растительный покров [13]. Почва несет основную техногенную нагрузку и позволяет дать интегральную оценку загрязнения радионуклидами территории в зоне влияния атомной электростанции. Растения, вследствие их аккумулялирующей способности, служат индикатором радиоактивного загрязнения наземных экосистем. При этом сельскохозяйственные культуры представляют собой первичное звено в пищевой цепи человека, что важно для оценки формирования доз облучения населения от техногенных радиоизотопов.

Большое количество российских АЭС расположены в зонах интенсивного ведения сельскохозяйственного производства. Например, в районах Курской и Ростовской АЭС

сельскохозяйственные угодья занимают до 90% сухопутной части 30-км зоны влияния атомных станций [14, 15]. Аграрная продукция, производящиеся вблизи атомных электростанций, – основной источник поступления радионуклидов в рационы питания населения, проживающего в районах расположения АЭС. Поэтому радиационный контроль сельскохозяйственной продукции местного производства – одно из обязательных условий корректной оценки последствий воздействия атомных электростанций на человека [10, 11].

Цель исследований – анализ данных многолетнего радиационно-экологического мониторинга аграрных экосистем в районах размещения российских атомных электростанций.

Методика. Для оценки влияния АЭС на агроферу рассмотрены четыре атомные электростанции с конструктивно отличающимися энергоблоками и временем их работы, расположенные в различных почвенно-климатических зонах (табл. 1).

Табл. 1. Характеристика Российских АЭС (данные на 2021 г.)

АЭС	Тип реактора	Период эксплуатации, годы
Белоярская	АМБ-100	1964–1983
	АМБ-200	1967–1990
	БН-600	с 1980 г. по настоящее время (н.в.)
	БН-800	с 2015 г. по н.в.
Курская	4 РБМК-1000	с 1976, 1979, 1983, 1985 гг. по н.в.
Ленинградская	РБМК-1000	1973–2018 гг.
	РБМК-1000	1975–2020 гг.
	2 РБМК-1000	с 1979, 1981 гг. по н.в.
	2 ВВЭР-1200	с 2018, 2020 гг. по н.в.
Ростовская	4 ВВЭР-1000	с 2001, 2010, 2014, 2018 гг. по н.в.

Это дало возможность максимально учесть комплекс факторов, влияющих на поступление техногенных радионуклидов при эксплуатации атомных электростанций в почвы агроэкосистем, сельскохозяйственную продукцию и продукты питания местного производства, включая типы реакторов, сроки их эксплуатации, природные и хозяйственные особенности территорий, близость других предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ) и зон радиоактивного загрязнения.

Аграрный сектор в зонах влияния исследуемых атомных электростанций многоотраслевой и включает в себя ведение как земледелия, так и животноводства. Сельскохозяйственная продукция местного производства составляет основу рационов питания населения. Радиологический мониторинг аграрных экосистем проводили в радиусе 30-км от радиационно-опасных объектов. В зоне влияния Белоярской АЭС он был организован в 2013–2019 гг. до и после ввода в эксплуатацию наиболее мощного в мире реактора на быстрых нейтронах БН-800 [16]. В районе расположения Курской АЭС мониторинг осуществляли в 2003–2019 гг. для оценки долговременного влияния эксплуатации реакторов РБМК на агроэкосистемы [14]. Для региона Ленинградской АЭС проанализирован более длительный период наблюдений (1980–2014 гг.), что позволило дать оценку влияния Чернобыльских выпадений на радиологическую обстановку в сельском хозяйстве [17]. В зоне влияния Ростовской АЭС мониторинг агроэкосистем проводили в период работы всех четырех энергоблоков ВВЭР с 2001 по 2018 гг. [15].

Для каждой атомной электростанции в соответствии с действующими требованиями [18] и международными рекомендациями [10, 11] была разработана детализированная программа радиационно-экологического мониторинга агроэкосистем и регламент проведения исследований, которые включали:

- схему сети пунктов (участков) наблюдения с географической привязкой;
- перечень объектов мониторинга;
- наблюдаемые параметры;
- способы и процедуры определения контролируемых параметров (измерения на месте, отбор проб и др.);
- периодичность проведения наблюдений;
- методы анализа отобранных проб.

Все участки сети радиоэкологического мониторинга выбирали с учетом «фозы» ветров на разном расстоянии и направлениях от АЭС так, чтобы на доминирующих типах почв осуществлялось возделывание основных сельскохозяйственных культур и производство преобладающих в рационе питания населения пищевых продуктов растениеводства и животноводства. При этом учитывали однородность рельефа и почвенно-растительного покрова. Количество точек наблюдения, их размещение и число отбираемых проб было достаточным для пространственной характеристики уровня содержания радионуклидов в почве и сельскохозяйственной продукции. В комплексе это обеспечило методическую основу оценки максимально возможного воздействия атомных электростанций на аграрные экосистемы.

Пробы почвы и сельскохозяйственной продукции отбирали на всех сельскохозяйственных угодьях: пашня, пастбища, огороды. Отбор проб почвы на пашне и огородах осуществляли из пахотного слоя (0–20 см), на пастбищах из верхнего почвенного слоя глубиной 10 см [18]. Образцы растительности отбирали сопряженно с почвой. В каждой точке пробоотбора измеряли мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД). Подготовку образцов к измерениям и их анализ на содержание радионуклидов выполняли в лаборатории радиационного контроля ФГБНУ ВНИИРАЭ, сертифицированной в системе Росаккредитация (RA.RU.21AД81). Полученные результаты по удельной активности радиологически значимых ^{137}Cs и ^{90}Sr в пищевых продуктах и кормах сельскохозяйственных животных сравнивали с нормативами [19, 20, 21]. Совместно со специалистами АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» (ГК «Росатом») проведены исследования содержания ^3H и ^{14}C в отдельных видах сельскохозяйственной и пищевой продукции, производящихся в районах размещения Белоярской и Ленинградской АЭС.

Результаты и обсуждение. Исследуемые АЭС при работе в штатном режиме выбрасывают в атмосферу широкий спектр техногенных радионуклидов: ^3H , ^{14}C , ^{41}Ar , $^{85,87,88}\text{Kr}$, $^{133,135,138}\text{Xe}$, ^{51}Cr , ^{54}Mn , $^{58,60}\text{Co}$, ^{90}Sr , ^{95}Nb , $^{131,133}\text{I}$, $^{134,137}\text{Cs}$ и др. [22]. Однако наиболее радиологически значимые и нормируемые в почве, сельскохозяйственной и пищевой продукции – долгоживущие ^{90}Sr и ^{137}Cs . Эти радионуклиды в соотношении $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ равном 1,6 определяют техногенный радиационный фон от глобальных радиоактивных выпадений в результате испытаний ядерного оружия. В ряде регионов России они также влияют на радиационную обстановку после крупных аварий на радиационно-опасных объектах. Так, ^{90}Sr после радиационной аварии на ПО «Маяк» в 1957 г. образовал Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). В результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. в большей степени на территории Брянской, Калужской, Тульской и Орловской областей выпал ^{137}Cs [23, 24].

В почвах агроэкосистем Белоярской, Курской, Ленинградской и Ростовской АЭС соотношение $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ составляет в среднем 2,2, 9,1, 9,3 и 2,5, соответственно. Таким образом, если в районах Белоярской и Ростовской АЭС зависимость

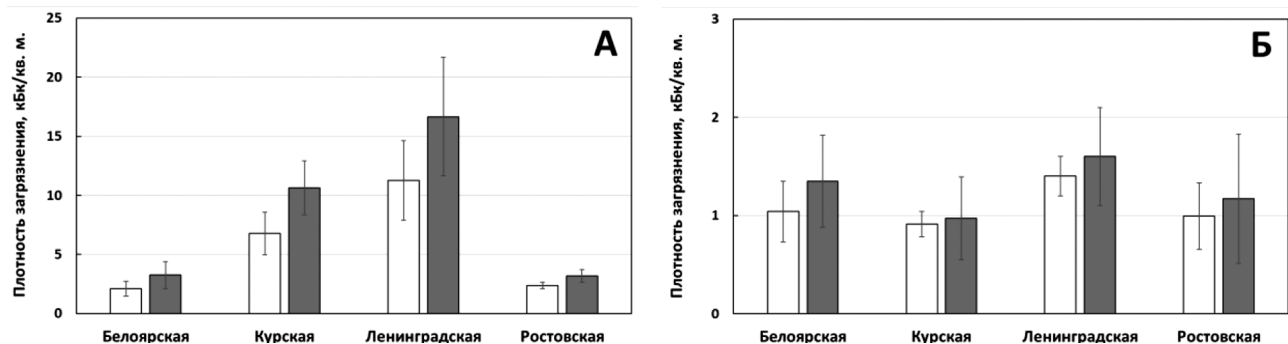


Рис. 1. Плотность загрязнения почв сельскохозяйственных угодий в 30-км зонах влияния атомных электростанций: А – ¹³⁷Cs, Б – ⁹⁰Sr; □ – пашня, ■ – пастбища.

радиоизотопов цезия и стронция близки к уровню глобальных радиоактивных выпадений, то возле Курской и Ленинградской атомных электростанций содержание в почвах ¹³⁷Cs гораздо выше и определяется аварийными выбросами Чернобыльской АЭС [14, 17]. Выделенные закономерности наглядно видны при сравнении современных уровней загрязнения почв сельскохозяйственных угодий радионуклидами в зонах влияния 4-х атомных электростанций (рис. 1). Для всех АЭС плотность загрязнения почв агроэкосистем ⁹⁰Sr варьирует в достаточно узких пределах – в среднем 0,9...1,6 kBq/m². Поверхностная активность в почвах сельскохозяйственных угодий ¹³⁷Cs, напротив, различается по атомным станциям до 5 раз и находится в диапазоне 2...17 kBq/m².

В 30-км зоне влияния Ленинградской АЭС в 1985 г. (до аварии на ЧАЭС) плотность загрязнения почв ¹³⁷Cs не превышала 3 kBq/m². В первый год после аварии (1986 г.) она возросла до 10 раз. На сегодняшний день (через 35 лет после аварии) уровни загрязнения почв ¹³⁷Cs значительно снизились из-за распада радионуклида, однако они все еще превышают доаварийный в 2...7 раз [17]. При этом участки агроэкосистем с максимальными уровнями загрязнения ¹³⁷Cs в районе Ленинградской АЭС нельзя отнести к радиоактивно загрязненным (более 37 kBq/m²).

Данные радиологического мониторинга свидетельствуют, что в районах размещения исследуемых АЭС содержание радиоизотопов наведенной активности (⁵⁴Mn, ⁵⁹Fe, ⁶⁰Co и др.), а также ¹³¹I и ¹³⁴Cs в почве агроэкосистем находится на уровнях ниже минимально детектируемых активностей.

Стабильность радиационной обстановки на сельскохозяйственных угодьях в районах атомных электростанций подтверждает низкий уровень мощности амбиентного экви-

валента дозы (МАЭД). Данные многолетнего мониторинга свидетельствуют, что в зоне влияния Белоярской атомной станции МАЭД варьирует в диапазоне 0,08...0,13 мкЗв/ч, в районе Курской АЭС – 0,11...0,15, в регионе Ленинградской АЭС – 0,09...0,15 и вблизи Ростовской АЭС на уровне 0,09...0,17 мкЗв/ч. Природный радиационный фон не превышает 0,3 мкЗв/ч.

Установлены некоторые отличия по плотностям загрязнения техногенными радионуклидами разных типов сельскохозяйственных угодий (см. рис. 1). Так, поверхностная активность в почвах лугопастбищных угодий ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr, как правило, в 1,1...1,6 раз выше, чем на пашне. Ежегодная перепашка почв приводит к перераспределению радионуклидов в корнеобитаемом слое и более интенсивной миграции радионуклидов.

Для оценки влияния атомных электростанций на поступление техногенных радионуклидов в агроэкосистемы проанализирована динамика их содержания в почве сельскохозяйственных угодий в районе расположения Ростовской АЭС, где вклад Чернобыльских выпадений, а также других предприятий ядерного топливного цикла минимальны (рис. 2).

За 20-летний период после запуска первого энергоблока ВВЭР содержание ⁹⁰Sr в почвах агроэкосистем зоны влияния Ростовской АЭС по данным мониторинга снижалось со скоростью, близкой к закону распада радионуклида как на пашне, так и на лугопастбищных угодьях (рис. 2, а). Таким образом, начало работы атомной станции в 2001 г. и ввод новых энергоблоков в 2010, 2014 и 2018 гг. не привели к значимому увеличению содержания ⁹⁰Sr в почвенном покрове сельскохозяйственных угодий. Уровни удельной активности в почве

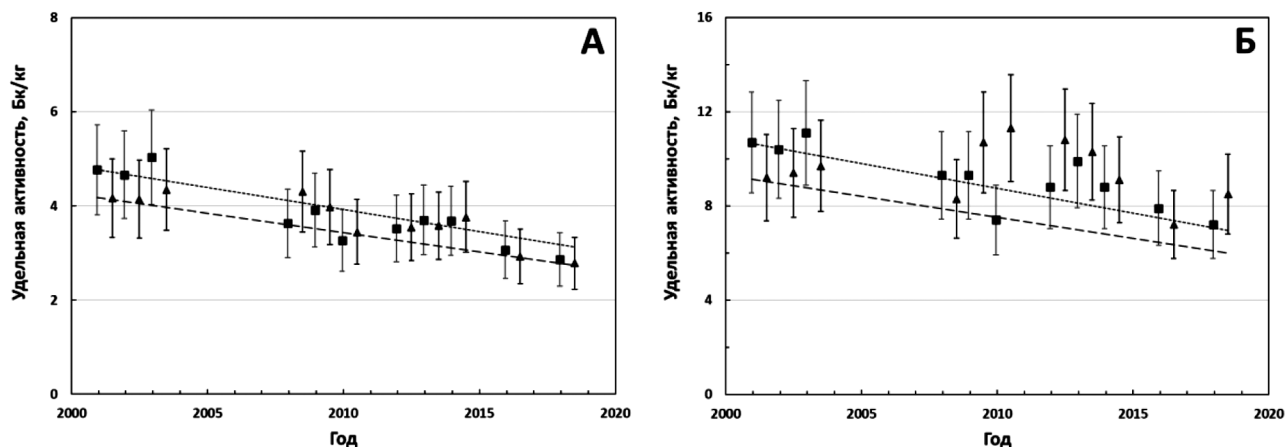


Рис. 2. Динамика удельной активности в почве сельскохозяйственных угодий 30-км зоны влияния Ростовской АЭС: А – ⁹⁰Sr и Б – ¹³⁷Cs (■ – данные мониторинга на пашне, ▲ – данные мониторинга на пастбищах, ----- – расчет распада на пашне, ---- – расчет распада на пастбищах).

Табл. 2. Удельная активность ¹³⁷Cs в сельскохозяйственной продукции в 30-км зоне влияния АЭС, Бк/кг(л)

Вид продукции (норматив)	Белоярская	Курская	Ленинградская	Ростовская
Продукция полеводства				
Зерно (60)	0,54* (0,15...0,84)	0,21 (0,04...0,50)	0,32 (0,14...0,71)	0,34 (0,17...0,90)
Картофель (80)	0,06 (0,03...0,09)	0,08 (0,01...0,48)	0,15 (0,07...0,43)	0,30 (0,11...0,91)
Корнеплоды (80)	0,07 (0,04...0,26)	0,09 (0,05...0,20)	0,34 (0,22...0,50)	0,19 (0,09...0,31)
Овощи (80)	0,06 (0,02...0,08)	0,07 (0,01...0,48)	0,22 (0,07...0,65)	0,12 (0,04...0,21)
Продукция кормопроизводства				
Сенаж (100)	1,83 (0,50...2,40)	2,11 (0,20...6,40)	2,43 (0,40...6,30)	1,72 (1,00...2,60)
Солома (400)	1,50 (0,70...3,90)	0,94 (0,20...3,70)	1,87 (0,88...4,50)	0,97 (0,62...1,78)
Продукция животноводства				
Молоко (100)	0,11 (0,06...0,20)	0,14 (0,02...0,30)	0,10 (0,02...0,21)	0,06 (0,01...0,16)
Говядина (200)	0,12 (0,08...0,15)	0,23 (0,22...0,23)	0,44 (0,33...0,54)	0,07
Свинина (200)	0,26 (0,06...0,45)	-	0,20 (0,19...0,21)	-
Птица (не нормируется)	0,21 (0,10...0,29)	0,04	-	-

* числитель – среднее, знаменатель – мин.-макс.

агрэкосистем ¹³⁷Cs значительно варьирующей, чем радиостронция. Отмечено, что Ростовская АЭС вносит определенный вклад в поступление ¹³⁷Cs в окружающую среду. В то же время, это не приводит к достоверному повышению содержания радиоизотопа в почве, а лишь снижает темпы уменьшения его удельной активности путем распада (рис. 2, б). В большей степени такая закономерность характерна для лугопастбищных угодий, где агротехнические мероприятия отсутствуют.

Среди рассмотренных атомных электростанций, в несколько большей степени ¹³⁷Cs содержится в сельскохозяйственной продукции региона Ленинградской АЭС, что обусловлено повышенной плотностью загрязнения радионуклидом почвы (табл. 2). Для обеспечения радиационной безопасности населения в районах размещения атомных электростанций важно сравнить содержание техногенных радионуклидов в производимой вблизи АЭС сельскохозяйственной продукции с требованиями радиологических стандартов. Средняя удельная активность ¹³⁷Cs в продукции растениеводства из 30-км зон влияния АЭС варьирует в пределах 0,06...0,54 Бк/кг, а максимальные уровни содержания радиоизотопа в 67...160 раз ниже действующих радиологических нормативов [19, 20, 21].

Концентрация ¹³⁷Cs в кормах сельскохозяйственных животных выше, чем в урожае зерновых культур и овощей. Однако диапазон удельных активностей ¹³⁷Cs в продукции растениеводства определяет не только содержание радионуклида в почве, но и другие факторы: почвенные характеристики сельскохозяйственных угодий, видовые и сортовые особенности культур, объемы применения агроудобрений и др. Так, в районе Белоярской АЭС преобладают дерново-подзолистые почвы, рядом с Курской АЭС – типичные и выщелоченные черноземы, а также серые лесные почвы. В зоне влияния Ленинградской АЭС основу почвенного покро-

ва составляют дерново-подзолистые и дерново-карбонатные почвы, а вблизи Ростовской АЭС – каштановые и темно-каштановые почвы.

В продукции животноводства удельная активность ¹³⁷Cs также не превышает 0,5 Бк/кг(л), при этом максимальное содержание радиоизотопа в 330...440 раз ниже действующих нормативов СанПиН [19, 20].

Несмотря на меньшее содержание в почве, ⁹⁰Sr в ряде случаев накапливается в сельскохозяйственной продукции в большем количестве, чем ¹³⁷Cs (до 1,5...2,0 раз). Однако для региона Белоярской АЭС эта разница достигает 3...4 раз, что обусловлено близостью ВУРСа и повышенным содержанием радиостронция в почве ряда участков агроэкосистем (табл. 3). Как и радиоизотоп цезия, ⁹⁰Sr в большей степени содержится в кормах сельскохозяйственных животных, чем в урожае зерновых культур и овощей, что определяется биологическими особенностями растений. В целом, максимальные уровни удельной активности ⁹⁰Sr в растениеводческой продукции из 30-км зон влияния АЭС в 10...40 раз ниже санитарно-гигиенических радиологических нормативов, а для молока такая разница составляет 60 раз. В мясе и птице радиостронций не нормируется.

На примере Курской АЭС показано, что с пищевыми продуктами местного производства в рацион питания населения поступает не более 70 Бк/год ⁹⁰Sr и 200 Бк/год ¹³⁷Cs. Это составляет менее 1 % от пределов годового поступления этих радиоизотопов в организм человека согласно требованиям (НРБ-99/2009) [14]. Таким образом, вклад в формирование доз внутреннего облучения населения от ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в составе продуктов питания ничтожно мал.

Необходимо отметить, что на формирование дозовых нагрузок на человека от выбросов АЭС помимо известных и хорошо контролируемых ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs оказывают влияние и другие радиоизотопы. Так, в последние годы существенно

Табл. 3. Удельная активность ⁹⁰Sr в сельскохозяйственной продукции в 30-км зоне влияния АЭС, Бк/кг(л)

Вид продукции (норматив)	Белоярская	Курская	Ленинградская	Ростовская
Продукция полеводства				
Зерно (не нормируется)	1,57* (1,03...2,80)	0,28 (0,12...0,99)	0,53 (0,41...0,68)	0,16 (0,11...0,27)
Картофель (40)	0,22 (0,08...0,36)	0,05 (0,02...0,08)	0,61 (0,44...0,99)	0,15 (0,06...0,28)
Корнеплоды (40)	0,23 (0,16...0,84)	0,14 (0,05...0,23)	0,91 (0,33...2,09)	0,21 (0,07...0,91)
Овощи (40)	0,17 (0,05...0,61)	0,09 (0,02...0,15)	1,22 (0,28...4,27)	0,07 (0,01...0,17)
Продукция кормопроизводства				
Сенаж (50)	1,78 (1,24...3,51)	1,53 (0,22...4,90)	0,72 (0,60...1,20)	1,21 (0,56...2,30)
Солома (180)	3,12 (2,34...3,60)	0,82 (0,51...3,4)	0,94 (0,85...1,4)	1,34 (0,67...1,71)
Продукция животноводства				
Молоко (25)	0,33 (0,18...0,41)	0,02 (0,01...0,05)	0,04 (0,01...0,08)	0,02 (0,01...0,06)
Говядина (не нормируется)	2,42 (2,10...2,60)	0,08 (0,02...0,14)	–	0,02
Свинина (не нормируется)	0,18 (0,14...0,28)	–	0,38	–
Птица (не нормируется)	0,21 (0,10...0,29)	0,04	–	–

* числитель – среднее, знаменатель – мин.-макс.

возрос интерес к определению накопления в продуктах питания таких малоизученных, но не менее радиологически важных радионуклидов, как ³H и ¹⁴C [7, 25]. Они присутствуют в составе выбросов всех типов реакторов российских АЭС и в ряде случаев могут вносить существенный (до 60...80 %) вклад в дозу облучения человека [22]. Тритий и радиоуглерод достаточно слабо удерживаются фильтрующими установками АЭС. Поступая в атмосферу, они активно мигрируют в природных средах, включаясь в пищевые цепи. Будучи биофильными радионуклидами, ³H и ¹⁴C способны легко проникать в клетки и генные структуры, повышая риск мутагенных нарушений в организме человека.

Табл. 4. Удельная активность ³H и ¹⁴C в сельскохозяйственной продукции в 30-км зоне влияния АЭС, Бк/кг(л)

Вид продукции	Белоярская		Ленинградская	
	³ H	¹⁴ C	³ H	¹⁴ C
Продукция полеводства				
Зерно	71,9* (40,2...85,0)	56,7 (34,2...69,3)	98	–
Картофель	28,3 (18,4...38,2)	18,5 (12,4...24,6)	29,3 (4,1...80,2)	84,6 (36,3...118,1)
Овощи	5,9 (3,2...8,7)	5,7 (4,1...8,0)	15,4 (5,7...40,2)	8,4 (5,4...11,0)
Продукция кормопроизводства				
Сенаж	193,0 (170,0...216,0)	108,0 (100,0...116,0)	31,2	65
Солома	–	–	92,2	95,4 (74,0...116,7)
Продукция животноводства				
Молоко	10,4 (9,5...11,3)	95,1 (57,6...132,6)	13,6 (3,1...34,0)	27,1 (5,4...51,0)

* числитель – среднее, знаменатель – мин.-макс.

Результаты исследования отдельных видов сельскохозяйственной продукции и пищевой продукции, производящейся в районах размещения Белоярской и Ленинградской АЭС, свидетельствуют о схожем характере накопления радиоизотопов ³H и ¹⁴C в аграрных продуктах из регионов обеих атомных электростанций (табл. 4).

По степени снижения удельной активности ³H и ¹⁴C, сельскохозяйственную продукцию можно расположить в следующий ряд: солома ≥ сенаж > зерно > картофель > молоко > овощи. Оценка вклада трития и радиоуглерода в дозоформирование населения – сложная методическая задача, начиная с методов определения форм радиоизотопов в пищевой продукции (например, органически связанный тритий и тритиевая вода) до верификации моделей оценок дозовых нагрузок на человека, учитывающих весь комплекс процессов миграции радионуклидов в экосистемах и по пищевым цепям. Поэтому необходимо совершенствование методов контроля ³H и ¹⁴C в сельскохозяйственной и пищевой продукции, производящейся в районах размещения АЭС, с учетом типов реакторных установок, режимов их эксплуатации и природно-климатических условий.

Таким образом, результаты мониторинговых исследований по оценке радиационной обстановки в сельском хозяйстве в районах расположения типичных российских АЭС свидетельствуют, что многолетняя работа атомных электростанций с разными типами энергоблоков не оказывает негативного влияния на агроферу и дополнительное облучение населения в 30-км зонах их влияния. МАЭД на пашне и лугопастбищных угодьях стабильно находится в пределах 0,08...0,17 мкЗв/час и не превышает природного радиационного фона (до 0,3 мкЗв/ч).

Эксплуатация атомных электростанций в технологически штатном режиме не приводит к значимому накоплению радиологически важных радионуклидов (⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs) в почвах агроценозов. За весь период многолетних

наблюдений не было обнаружено участков агроэкосистем с превышением минимально установленной границы зон радиоактивного загрязнения (37 кБк/м² по ¹³⁷Cs).

Повышенные уровни содержания техногенных радионуклидов в почвенном покрове сельскохозяйственных угодий, в районах расположения ряда атомных станций, обусловлены не их многолетней работой, а загрязнением, сформировавшимся после крупных радиационных аварий и, частично, в результате «радиационного наследия», включая испытания ядерного оружия и прошлую деятельность предприятий ЯТЦ.

Весь спектр производимой в районах размещения АЭС сельскохозяйственной и пищевой продукции (растениеводства и животноводства) полностью отвечает действующим радиологическим стандартам, а максимальные удельные активности ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в ней на 1...2 порядка ниже уровней вмешательства радиологических нормативов.

Необходимо продолжение радиоэкологического мониторинга агроферы в зонах влияния атомных электростанций, а также расширение спектра исследуемых радиологически значимых радионуклидов (³H, ¹⁴C, ²³⁹,²⁴⁰Pu и др.), изучение закономерностей их миграции по пищевым цепям и влияния на формирование доз облучения человека.

Литература

1. Alexakhin R.M. Topical environmental problems of nuclear power // *Atomic Energy*. 2013. Vol. 114. No. 5. 301–307.
2. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. No. GSR. Part 3. Vienna: IAEA, 2014. 436 p.
3. Вероятность получения молока и кормов, не соответствующих допустимым уровням содержанию ¹³⁷Cs на территории юго-запада Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС / Н.М. Беловус, П.В. Прудников, А.М. Щеглов и др. // *Радиация и Риск*. 2019. Т. 28. № 3. С. 36–46.
4. Мерзлова О.А. Прогноз возможности возврата в сельскохозяйственный оборот земель Могилевской области Республики Беларусь, выведенных в связи с высоким радиоактивным загрязнением // *Радиация и Риск*. 2021. Т. 30. № 3. С. 21–31.
5. Environmental Transfer of Radionuclides in Japan following the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. IAEA TECDOC No. 1927. Vienna: IAEA, 2020. 358 p.
6. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: Издат, 2010. 496 с.
7. Environmental radiation safety assessment in the control area at nuclear facilities / И.И. Крышев, Н.Н. Павлова, Т.Г. Сазыкина, et al. // *Atomic Energy*. 2021. Vol. 130. No. 2. 119–125.
8. Analysis of the influence of nuclear facilities on environmental radiation by monitoring the highest nuclear power plant density region / U. Lee, C. Lee, M. Kim, et al. // *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. Vol. 51. P. 1626–1632.
9. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2003–2020 годы. Ежегодники Росгидромета. Обнинск: НПО «Тайфун».
10. Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection. RS-G-1.8. Vienna: IAEA, 2005. 119 p.
11. Programmes and systems for source and environmental radiation monitoring. Safety Reports Series No. 64. Vienna: IAEA, 2010. 234 p.
12. Основы радиоэкологического и гигиенического мониторинга окружающей среды / И.П. Коренков, Т.Н. Лазарева, Н.К. Шандала и др. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021. 400 с.
13. Djingova R., Kuleff I. Concentration of caesium-137, cobalt-60 and potassium-40 in some wild and edible plants around the nuclear power plant in Bulgaria // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002. Vol. 59. P. 61–73.
14. Анализ результатов радиационно-экологического мониторинга в регионе размещения Курской АЭС / В.К. Кузнецов, А.В. Панов, Н.И. Санжарова и др. // *Радиационная гигиена*. 2020. Т. 13. №2. С. 19–30.
15. Радиационно-экологический мониторинг в регионе размещения Ростовской АЭС. Анализ результатов многолетних исследований / А.В. Панов, Н.Н. Исамов, В.К. Кузнецов // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12. №2 (специальный выпуск). С. 54–65.
16. Радиационно-экологический мониторинг агроэкосистем в районе Белоярской АЭС / А.В. Панов, А.В. Трапезников, В.К. Кузнецов и др. // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332. №3. С. 146–157.
17. Анализ результатов радиоэкологического мониторинга в регионе размещения Ленинградской АЭС / В.К. Кузнецов, П.Н. Цыганцев, Н.И. Санжарова и др. // *Радиация и Риск*. 2021. Т. 30. №2. С. 89–100.
18. Организация государственного радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия радиационно-опасных объектов. МУ 13.5.13-00. М.: Изд-во РАСХН, 2000. 28 с.
19. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.3.2.1078-01. М.: ФГУП «ИнтерСЭН», 2002. 168 с.
20. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.3.2.2650-10. (Дополнения и изменения № 18 к СанПиН 2.3.2.1078-01). М.: Минздрав РФ, 2010. 13 с.
21. Ветеринарно-санитарные требования к радиационной безопасности кормов, кормовых добавок, сырья кормового. Допустимые уровни содержания ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs. Ветеринарные правила и нормы ВП 13.5.13/06-01 // *Ветеринарная патология*. 2002. № 4. С. 44–45.
22. Special monitoring results for determination of radionuclide composition of Russian NPP atmospheric releases / M. Vasyanovich, A. Vasilyev, A. Ekinin et al. // *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. Vol. 51. P. 1176–1179.
23. Итоги многолетнего мониторинга трансграничного воздушного переноса техногенных радионуклидов на территорию Свердловской области с объектов ядерного топливного цикла, расположенных в Челябинской области / В.Н. Трапезникова, А.В. Коржавин, А.В. Трапезников и др. // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2017. №1. С. 84–93.
24. Оценка радиоэкологической обстановки на территориях аварийного Чернобыльского следа в России (1986–2020) / И.И. Крышев, А.А. Бурякова, Т.Г. Сазыкина // *Радиация и Риск*. 2021. Т. 30. №2. С. 25–37.
25. Korolevych V.Y., Kim S.B., Davis P.A. OBT/HTO ratio in agricultural produce subject to routine atmospheric releases of tritium // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. Vol. 129. P. 157–168.

Поступила в редакцию 22.11.2021
После доработки 15.12.2021
Принята к публикации 20.01.2022

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

УДК 631.358:633.521

DOI: 10.31857/S2500262722010094

НАУЧНЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ОЧЕСА СЕМЕННЫХ КОРОБОЧЕК ПРИ ДВУХФАЗНОЙ УБОРКЕ ЛЬНА-ДОЛГУНЦА*

Ю.Ф. Лачуга¹, академик РАН, А.Н. Зинцов², доктор технических наук,
М.М. Ковалев³, доктор технических наук, Г.А. Перов³, кандидат технических наук

¹Российская академия наук,

119334, Москва, Ленинский проспект, 32 А

²Костромская государственная сельскохозяйственная академия»,

156530, Кострома, пос. Караваяево, 34

³Федеральный научный центр лубяных культур,

170041, Тверь, Комсомольский проспект, 17/56

E-mail: m.kovalev@fncl.ru

Одна из технологий, используемых при производстве льна-долгунца – двухфазная уборка. Во второй фазе ее реализации проводится очес семенных коробочек с ленты стеблей, качество которого зависит от положения ленты стеблей относительно гребней очесывающего аппарата. Цель исследования — изучение процессов и разработка устройств для ориентированной подачи ленты растений в очесывающий аппарат подборщика-очесывателя при двухфазной уборке льна-долгунца. Наиболее значимый фактор для обеспечения качественного очеса — устранение ошибок копирования кривизны ленты растений льна подбирающим рабочим органом в плоскости поверхности поля. В результате теоретических исследований установлено, что при работе гребневого очесывающего аппарата указанные ошибки могут вызвать снижение чистоты очеса до 88,4 %. Доминирующее влияние этого фактора на потери семян получило экспериментальное подтверждение. Исключить или значительно уменьшить потери семян можно путем исправления ошибок копирования кривизны ленты растений льна. Решение такой задачи возможно путем использования устройства для ориентированной подачи растительной массы в очесывающий аппарат и системы автоматического управления взаимным расположением этих рабочих органов.

SCIENTIFIC ASPECTS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF SEEDPOD COMBING PROCESSES IN TWO-PHASE HARVESTING OF FLAX

Lachuga Yu. F.¹, Zintsov A.N.², Kovalev M. M.³, Perov G. A.³

¹Russian Academy of Sciences,

119334, Moskva, Leninskii prosp., 32 A

²Kostroma State Agricultural Academy,

156530, Kostroma, pos. Karavaevo, 34

³Federal Research Center for Bast Crops,

170041, Tver', Komsomol'skii prospekt, 17/56

E-mail: m.kovalev@fncl.ru

One of the applied technologies for the production of flax is the technology of two-phase harvesting. In the second phase of this technology, seed pods are combed from the ribbon of stems. The indicators of the quality of the comb depend on the position of the ribbon of the stems relative to the combs of the combing apparatus. The purpose of the study is to develop and study processes and devices for oriented feeding of plant tape into the combing apparatus of the picker-comber during two-phase harvesting of flax. It is noted that the most significant factor for ensuring high-quality coverage is the elimination of errors in copying the ribbon of flax plants by the selecting working body in the plane of the field surface. As a result of theoretical studies, it was found that during the operation of the apparatus for separating seeds from stems, these errors can cause a decrease in the purity of separating seeds to 88,4%. At the same time, the dominant influence of this factor on seed losses was experimentally confirmed. It is possible to eliminate or significantly reduce seed losses by correcting errors in copying the curvature of the flax plant ribbon. Solutions to this problem are proposed by using a device for the oriented supply of plant mass to the combing apparatus and automatic control systems for the mutual arrangement of these working bodies.

Ключевые слова: лен, технология двухфазной уборки, очесывающий аппарат, лента растений, копирование, систематическая ошибка, ориентирующее устройство.

Key words: flax, two-phase harvesting technology, combing apparatus, plant tape, copying, systematic error, orienting device.

Результативность производства льна-долгунца обусловлена множеством факторов, самый весомый среди которых – технология уборки: комбайновая, двухфазная или комбинированная [1-3]. Наибольший интерес представляет технология двухфазной уборки из-за возможности получения высококачественной льнопродукции при заметном снижении ее себестоимости [4-6].

Для реализации первой фазы технологии двухфазной уборки используют навесные, прицепные или самоходные льнотеребилки. Вторая, наиболее ответственная, фаза предусматривает сбор семенной части урожая, при

котором отделение семенных коробочек от стеблей в поле выполняют подборщиками-очесывателями, чаще всего оснащенными гребневыми очесывающими аппаратами. Работа аппаратов такого типа всесторонне и глубоко исследована применительно к технологии комбайновой уборки [7, 8, 9].

При этом установлена зависимость между геометрическими параметрами гребневого очесывающего аппарата и шириной зоны активного действия его гребней $B_{аз}$ [10, 11, 12]. Разработана методика расчета размера зоны семенных коробочек в ленте растений льна $B_{л}$,

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНЦ ЛК (№ FGSS-2022-0005)

подаваемой в очесывающий аппарат, с учетом дальнейшего увеличения ее размера в результате воздействия на растения теребивными рабочими органами комбайна [11]. Известно, что для наиболее полного сбора семян размер $B_{аз}$ зоны активного действия гребней очесывающего аппарата должен превышать ширину зоны B_n [6, 12, 13]. Однако знание указанных технологических зон — только служит основой для дальнейшего поиска путей увеличения сбора льнопродукции при работе гребневых очесывающих аппаратов.

Установлено также [14, 15, 16], что все процессы, происходящие на входе в очесывающий аппарат льнокомбайна, имеют случайный характер. При этом изменение ширины зоны возможного расположения семенных коробочек в очесываемой ленте растений зависит от множества изменяющихся факторов [6]:

$$B_n(t) = b_a(t) + b_\lambda(t) + l(t), \quad (1)$$

где $b_a(t)$ — процесс изменения зоны семенных коробочек на растениях;

$b_\lambda(t)$ — процесс изменения величины продольного смещения (растянутости) стеблей в ленте под воздействием рабочих органов теребивной части льнокомбайна; $l(t)$ — процесс изменения высоты стеблестоя льна.

Главным тезисом в анализируемых работах [10, 11] было условие полного отделения семенных коробочек от стеблей:

$$B_{аз} \geq B_n(t). \quad (2)$$

Практические расчеты с использованием числовых характеристик, представленных в работе [6], показали, что ординаты процесса $B_n(t)$ на входе в очесывающий аппарат льноуборочного комбайна ЛК-4А располагаются в границах от 0,35 до 0,56 м. Результаты сравнения полученного диапазона с реальным размером $B_{аз}$, равным 0,55 м [13], свидетельствуют о надежном соблюдении условия неравенства (2) в подавляющем большинстве случаев. Следует отметить, что представленное соотношение касается только размеров зон $B_{аз}$ и B_n и является необходимым, но не достаточным условием для обеспечения максимального сбора семян при комбайновой уборке. Для достижения обозначенного эффекта необходимо также знать оптимальную согласованность указанных технологических зон в пространстве. Очевидно, что такое заключение может быть справедливым и по отношению ко второй фазе технологии двухфазной уборки. Однако, несмотря на высокую эффективность указанной технологии, пространственная согласованность зоны активного действия гребней очесывающего аппарата и зоны возможного расположения семенных коробочек в ленте растений при работе подборщиков-очесывателей нуждается в дополнительном исследовании и обосновании.

Цель исследования — изучение процессов и разработка устройств для ориентированной подачи ленты растений в очесывающий аппарат подборщика-очесывателя при двухфазной уборке льна долгунца.

Методика. При проведении исследования использовали методы общего и логического анализа, а также расчетно-конструктивный метод. Теоретические исследования выполняли методами теоретической и аналитической механики, теории механизмов и машин, а также методами решения задач с использованием ПК. Экспериментальное подтверждение полученных результатов было выполнено с использованием стандартных методик и методов математической статистики [17, 18] на лабораторной установке, состоящей из очесывающего аппарата льноуборочного комбайна ЛК-4А, питающего транспортера, системы привода указанных рабочих

органов, блока управления и устройства для сбора продуктов очеса [6].

При проведении исследований исходили из того, что главным критерием качества работы подборщика-очесывателя лент льна служит чистота очеса $Ч$ семенных коробочек со стеблей, а структурные параметры ленты льна (кривизна, растянутость, длина и перекосы стеблей в ленте) и процесс ее копирования подбирающим аппаратом при подъеме с поверхности поля имеют случайный характер.

Для большей реалистичности последующих рассуждений необходимо отметить, что гребневой аппарат подборщика-очесывателя работает в более сложных условиях из-за расширения границ возможного расположения вершин стеблей с семенными коробочками в обрабатываемой ленте растений на входе в очесывающий аппарат на величину дополнительной помехи $y_6(t)$. Появление $y_6(t)$ — это следствие, точно повторяющее ошибки копирования или поперечных отклонений подбирающего аппарата от ленты льна в горизонтальной плоскости [6, 13].

Наблюдения за работой машинных агрегатов в поле показали, что при движении льноподборщиков механизаторы направляют подбирающий рабочий орган на ленту льна, используя различные ориентирные на ее поверхности. В зависимости от личных предпочтений в качестве ориентиров они используют ординаты линий, проходящих по комлевой или вершинной частям ленты растений, или по середине ее ширины.

Анализ представленных способов управления процессом подбора показал, что копирование ленты растений льна по середине ее ширины или по комлевой части расширяет диапазон $B_n(t)$ возможного расположения семенных коробочек относительно активной зоны $B_{аз}$ очесывающего аппарата подборщика-очесывателя. При копировании по середине этот диапазон увеличивается на половину величины изменения длины стеблей, а при копировании по комлям — на всю указанную величину. В рассмотренных вариантах подборщик-очесыватель должен иметь передвижной очесывающий аппарат, способный сохранять свое оптимальное положение относительно ленты растений при изменении длины последних. Однако большинство научных и проектных организаций, занимающихся созданием подборщиков-очесывателей, идут по упрощенному пути и проектируют очесывающие аппараты в неподвижном исполнении. Такая конструкция обуславливает целесообразность копирования ленты растений по ординатам расположения их вершинной части. При этом оптимальность и стабильность положения семенных коробочек в ленте относительно активной зоны $B_{аз}$ очесывающего аппарата будут также зависеть и от случайного процесса $y_6(t)$. Вместе с тем, влияние процесса $l(t)$ изменения длины стеблей растений (высоты стеблестоя) на зависимость (1) будет исключено. Из этого следует, что для неподвижного очесывающего аппарата подборщика-очесывателя ширина зоны возможного расположения семенных коробочек в ленте растений льна относительно $B_{аз}$ будет равна:

$$B_n(t) = b_a(t) + b_\lambda(t) + y_6(t). \quad (3)$$

Очевидно, что сбор семян возможен только с той части зоны их расположения, которая попадет в активную зону $B_{аз}$ действия гребней очесывающего аппарата.

Теоретические исследования решения поставленной задачи проводили при следующих допущениях:

чистота очеса семенных коробочек, попавших в зону $B_{аз}$, составляет 100%;

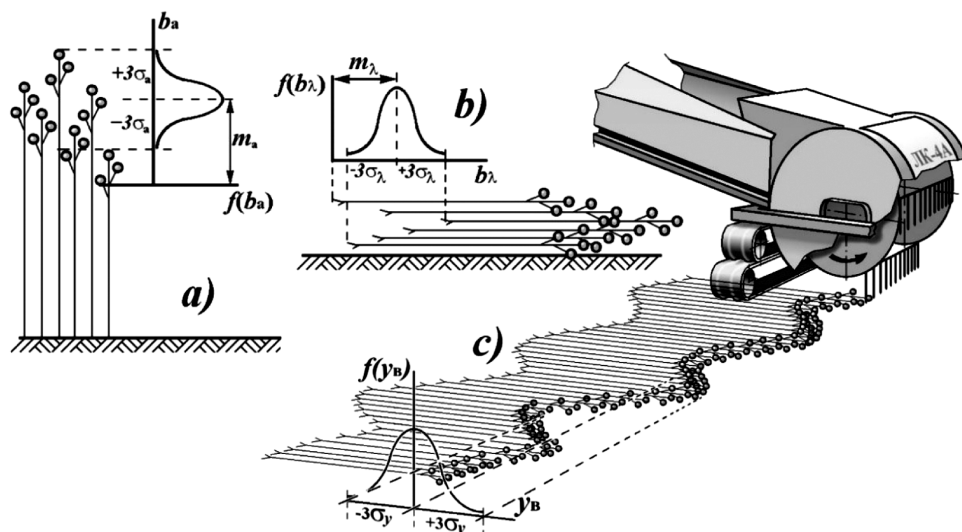


Рис. 1. Формирование зоны возможного расположения семенных коробочек в ленте льна относительно активной зоны очесывающего аппарата: *a* — процесс изменения зоны семенных коробочек на растениях; *b* — процесс изменения величины продольного смещения (растянутости) стеблей в ленте под воздействием рабочих органов льнотеребилок; *c* — процесс изменения ординаты вершин стеблей на входе в очесывающий аппарат в результате случайных поперечных отклонений подборщика от ленты растений льна.

все структурные параметры ленты растений льна после ее подбора и до поступления в очесывающий аппарат остаются неизменными;

все анализируемые процессы независимы с коэффициентом их взаимной корреляции, равным нулю;

все случайные процессы, обозначенные в работе, имеют стационарный характер;

расположения ординат в реализациях случайных процессов $b_a(t)$, $b_\lambda(t)$ и $y_b(t)$ подчинены нормальному закону распределения (рис. 1).

В соответствии с принятым пятым допущением все значения ординат в реализациях случайных процессов $b_a(t)$, $b_\lambda(t)$ и $y_b(t)$ распределены по нормальному закону, который задаётся функцией плотности вероятности [12]:

$$f(x) = (1/\sigma\sqrt{2\pi}) \cdot e^{-(x-m)^2/2\sigma^2}, \quad (4)$$

где σ — среднее квадратическое отклонение; m — математическое ожидание.

Отсутствие математического ожидания или его нулевое значение у процесса $y_b(t)$ свидетельствует о том (см. рис. 1, c), что механизатор при управлении агрегатом направляет подбирающий аппарат ориентируясь только на макроизгибы кривизны ленты льна [13], оставляя за пределами фильтрации высокочастотные колебания этого процесса. При этом среднее квадратическое отклонение σ_y характеризует диапазон рассеивания амплитуд неотфильтрованной части колебательного спектра, относительно нулевого значения, в правую и левую стороны.

Анализ зависимости (3) с учетом последнего допущения показал на наличие композиции нормальных законов распределения ординат в реализациях случайных процессов $b_a(t)$, $b_\lambda(t)$ и $y_b(t)$. Опираясь на известное свойство «устойчивости» нормального закона [14, 17], математическое ожидание композиционного процесса $B_a(t)$ или центр рассеивания его значений будет определен по выражению:

$$m_{B_a} = m_a + m_\lambda, \quad (5)$$

причем $m_\lambda = (m_{\lambda_{\text{отн}}} - 1) \cdot m_\lambda$, а среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_{B_a} = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\lambda^2 + \sigma_y^2}, \quad (6)$$

где m_a и σ_a — математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение процесса изменения размера зоны семенных коробочек на растениях (см. рис. 1, a); m_λ и σ_λ — математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение процесса изменения абсолютной величины продольного смещения (растянутости) стеблей в ленте под воздействием рабочих органов теребилок льна (см. рис. 1, b); $m_{\lambda_{\text{отн}}}$ — математическое ожидание процесса изменения относительной растянутости стеблей в ленте; m_λ — математическое ожидание процесса изменения высоты стеблестоя.

С учетом выражений (5) и (6) плотность вероятности композиционного распределения значений ширины зоны возможного расположения семенных коробочек в ленте растений льна относительно B_{a3} примет вид:

$$f(B_a) = (1/\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\lambda^2 + \sigma_y^2}) \cdot (1/\sqrt{2\pi}) \cdot e^A, \quad (7)$$

$$\text{где } A = -\left(\frac{B_a - (m_a + m_\lambda)}{\sigma_a^2 + \sigma_\lambda^2 + \sigma_y^2}\right)^2.$$

В работах [14, 15, 16] установлено, что расположение комлей и вершин в ленте подчиняется закону нормального распределения. Для проведения дальнейших вычислений следует определить основные числовые характеристики этого распределения m_c и σ_c (рис. 2).

С учетом известного «правила трех сигма» [17], ширина зоны возможного расположения семенных коробочек в ленте растений льна изменяется в диапазоне:

$$B_a = m_{B_a} \pm n \cdot \sigma_{B_a}, \quad (8)$$

где n — количество средних квадратических отклонений (с учетом «правила трех сигма» $n = 0...3$).

Ординаты расположения основных параметров распределения количества N_c семенных коробочек по зоне B_a с учетом выражения (8) определяются следующим образом:

$$m_c = (m_{B_a} \pm n \cdot \sigma_{B_a}) / 2, \quad (9)$$

$$\sigma_c = (m_{B_a} \pm n \cdot \sigma_{B_a}) / 6. \quad (10)$$

При работе машины указанная оптимальность будет достигнута при постоянном совпадении ординаты середины активной зоны очесывающего аппарата $B_{a3} / 2$ и ординаты центра рассеивания количества семенных коробочек m_c (см. рис. 2, a).

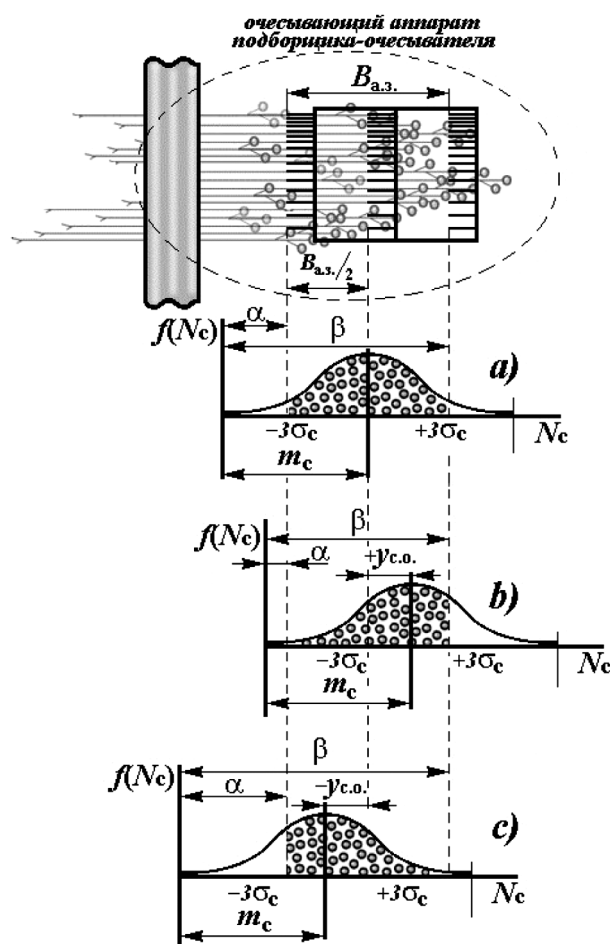


Рис. 2. Варианты нарушений оптимального согласования технологических зон (чистота очеса схематически выделена долей площади под кривой $f(N_c)$, заполненной семенными коробочками).

Чистоту очеса можно представить в виде вероятности P попадания случайной величины N_c на участок от α до β :

$$Ч = P(\alpha < N_c < \beta), \quad (11)$$

где α и β — ординаты проекций границ зоны B_{az} на кривую $f(N_c)$ распределения семян по сечению ленты.

В штатной ситуации при оптимальной согласованности технологических зон B_{az} и B_{az} в результате точного копирования всех изгибов подбираемой ленты льна видно (см. рис. 2, а), что в (11) $\alpha = m_c - (B_{az} / 2)$, а $\beta = m_c + (B_{az} / 2)$.

Во всех наблюдаемых реализациях обнаружены «стационарные помехи» в виде систематических ошибок y_{co} копирования или случайных поперечных отклонений подборщика от ленты растений льна. Математические ожидания m_i выявленных ошибок имели значения от $-0,092$ до $+0,114$ м [6]. Анализ механизма возникновения «стационарных помех» показывает на то, что они не оказывают влияния на ширину зоны возможного расположения семенных коробочек в ленте растений. При появлении ошибки y_{co} происходит смещение технологической зоны B_{az} относительно зоны B_{az} на величину этой ошибки (см. рис. 2, б, с). Поэтому использование значения систематической ошибки y_{co} в дальнейших расчетах в виде математического ожидания процесса $y_a(t)$ нецелесообразно. При этом знак «плюс» означает, что подбирающий рабочий орган, а значит и очесывающий

аппарат (см. второе допущение), имеют систематическое отклонение на величину y_{co} от выбранных ориентиров вправо, ближе к комлевой части ленты растений, а знак «минус» влево. Среднее квадратическое отклонение σ_y процесса $y_a(t)$ характеризует диапазон рассеивания амплитуд его колебаний без учета систематической ошибки y_{co} .

При появлении систематической ошибки y_{co} (см. рис. 2, б, с), ординаты α и β проекций границ зоны B_{az} на кривую $f(N_c)$ сместятся на величину этой ошибки, то есть $\alpha = (m_c - (B_{az} / 2)) \pm y_{co}$ и $\beta = (m_c + (B_{az} / 2)) \pm y_{co}$.

Представляя чистоту очеса через стандартную функцию распределения $\Phi(Z)$ имеем:

$$Ч = \Phi((\beta - m_c) / \sigma_c) - \Phi((\alpha - m_c) / \sigma_c). \quad (12)$$

Аргументы функции Φ в формуле (12) есть расстояние $(\beta - m_c) / \sigma_c$ от правого конца участка β до центра рассеивания m_c , выраженное в средних квадратических отклонениях σ_c , а $(\alpha - m_c) / \sigma_c$ — расстояние от левого конца участка α .

Для практических расчетов комплексной оценки зависимости чистоты очеса от влияния случайных процессов $b_a(t)$, $b_\lambda(t)$ и $y_a(t)$ с учетом систематической ошибки y_{co} проведем подстановку формул (5), (6) и (10) и запишем уравнение (12) в виде:

$$Ч = \Phi(B / C) - \Phi(D / C), \quad (13)$$

$$\text{где } B = 6[(B_{az} / 2) \pm y_{co}];$$

$$C = m_a + (m_{\lambda, \text{отн}} - 1) \cdot m_i \pm n \sqrt{(\sigma_a^2 + \sigma_\lambda^2 + \sigma_y^2)};$$

$$D = -6 \cdot [(B_{az} / 2) \pm y_{co}].$$

Чистота очеса $Ч$ при работе подборщика-очесывателя определяется по выражению (13) через табличные значения стандартной функции распределения Φ [17], зависит от систематической ошибки y_{co} и основных параметров исследуемых процессов: математических ожиданий m_a , m_p , $m_{\lambda, \text{отн}}$ и средних квадратичных отклонений σ_a , σ_λ , σ_y .

Исследование зависимости (13) будем проводить в диапазоне значений систематических ошибок от $-0,1$ до $+0,1$ м [6, 16]. Уменьшение ширины зоны возможного расположения семенных коробочек в ленте растений льна не окажет отрицательного влияния на качество работы очесывающего аппарата (см. условие (2)). Поэтому анализ целевой функции $Ч$ проведем только в направлении расширения указанной зоны $m_{Bz} \rightarrow m_{Bz} + n \cdot \sigma_{Bz}$ с использованием усредненных значений основных параметров случайных процессов (см. табл.), полученных в итоге многолетних научных исследований [6, 11].

Результаты и обсуждение. Анализ расчетной графической зависимости чистоты (полноты) очеса $Ч$ семян при работе подборщика-очесывателя показал, что качество работы подборщика с неподвижным очесывающим аппаратом в большинстве случаев не будет удовлетворять агротехническим требованиям (рис. 3). При самом неблагоприятном стечении исследуемых обстоятельств

Значения основных параметров исследуемых процессов

Параметр	m_a , см	m_p , см	$m_{\lambda, \text{отн}}$	σ_a , см	$\sigma_{\lambda, \text{отн}}$	σ_y , см
Значение параметра	20,7	80,0	1,4	5,05	0,10	5,71

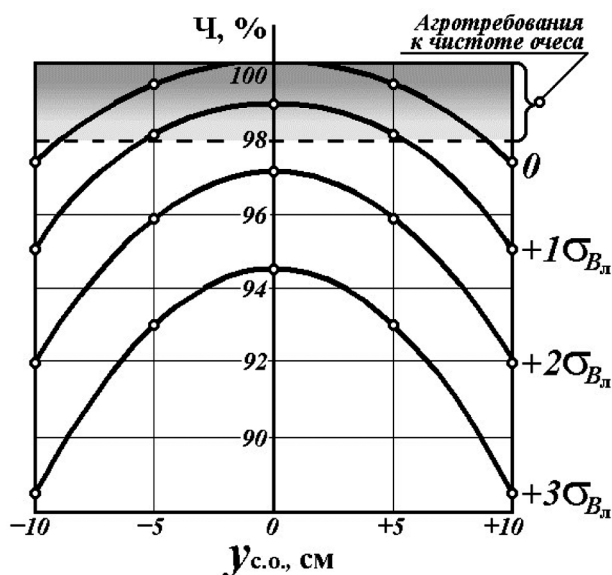


Рис. 3. Зависимость чистоты очеса Ч семян от систематической ошибки u_{co} копирования ленты льна и ширины $B_{л}$ зоны возможного расположения семенных коробочек.

($y_{co} = \pm 0,1m$ и $B_{л} = m_{B_{л}} + 3 \cdot \sigma_{B_{л}}$) величина этого показателя может снизиться до 88,4 %. При этом доля потерянных семян, не попавших в границы $B_{аз}$ активного действия гребней очесывающего аппарата, обусловлена расширением технологической зоны $B_{л}$ из-за влияния на нее случайных процессов $b_a(t)$, $b_{л}(t)$. Указанное расширение обусловлено качеством выполнения технологических операций от подготовки семян и поля к посеву до первой фазы двухфазной уборки включительно [1, 4, 11]. При реализации второй фазы эту часть расширения уменьшить практически невозможно [9, 10].

Другая, наибольшая часть потерь семян вызвана пространственным рассогласованием технологических зон $B_{аз}$ и $B_{л}$ под влиянием случайного процесса $y_{г}(t)$.

В ходе экспериментальных исследований по определению зависимости потерь семян $Q_{сем}$ при очесе семенных коробочек с ленты стеблей гребневым очесывающим аппаратом от размера зоны семенных коробочек в ленте льна $B_{л}$, ординаты указанной зоны относительно очесывающего аппарата $y_{в}$ и плотности стеблевой массы ρ была получена математическая модель адекватно характеризующая исследуемый процесс [6, 13]:

$$Q_{сем} = 5,315 - 7,758 \cdot y_{в} + 3,194 \cdot B_{л} - 0,577 \cdot \rho - 1,166 \cdot B_{л}^2 + 4,782 \cdot y_{в}^2 - 3,483 \cdot B_{л} \cdot y_{в} - 0,465 \cdot B_{л} \cdot \rho + 0,569 \cdot y_{в} \cdot \rho. \quad (14)$$

Анализ зависимости (14) показал основную роль в формировании потерь семенной части урожая факторов $B_{л}$ и $y_{в}$.

Для снижения влияния фактора $B_{л}$ на потери семян $Q_{сем}$ следует формировать минимальный размер зоны семенных коробочек в ленте растений путем использования для посева кондиционных семян высоких репродукций и качественного выполнения технологических операций, начиная от подготовки поля к посеву и до тербления льна.

Более заметно уменьшить указанные потери можно путем исправления ошибок копирования кривизны ленты льна перед подачей ее в очесывающий аппарат. Для этого в конструкции подборщика-очесывателя це-

лесообразно использовать разработанное специальное ориентирующее устройство (рис. 4) [17, 18, 19]. Оно включает в себя стол 3, выполненный под углом γ к горизонтали, систему двух транспортирующих конвейеров 6 и 7, у которых рабочие поверхности находятся в плоскости стола 3, и одного выравнивающего конвейера 8, установленного перпендикулярно столу 3. При этом, несмотря на усложнение конструкции машины, очесывающий аппарат должен быть выполнен с возможностью перемещения в направлении наклона γ стола 3.

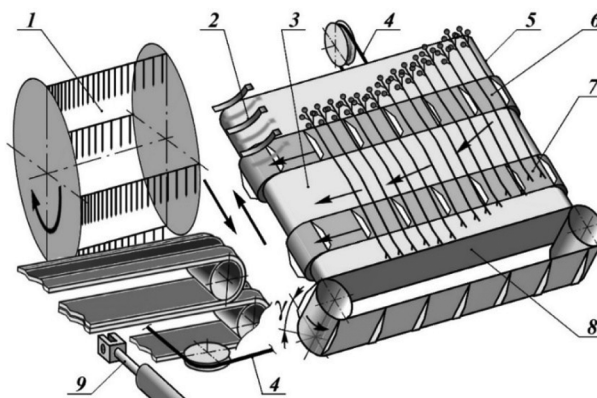


Рис. 4. Схема и принцип работы ориентирующего устройства.

В основу работы устройства 5 положено смещение стеблевой массы под воздействием силы тяжести в направлении наклона γ стола 3. Величина смещения зависит от случайных колебаний ординат процесса $y_{г}(t)$ и ограничена рабочей поверхностью конвейера 8. Таким образом выполняется фильтрация указанных колебаний и положение ленты льна относительно очесывающего аппарата стабилизируется. Процесс стабилизации происходит во время передачи стеблей конвейерами 6 и 7 от подбирающего рабочего органа (на рисунке не показан) к очесывающему аппарату 1.

С целью обеспечения оптимальной согласованности в пространстве зон $B_{л}$ и $B_{аз}$ при изменении длины Δl растительного выравнивающего конвейера 8 и очесывающий аппарат 1 должны перемещаться один относительно другого в противоположные стороны в направлении осей стеблей, каждый на величину $\Delta l/2$. Для этого указанные рабочие органы имеют кинематическую связь в виде тросовой системы 4 и гидроцилиндр 9, управляемый механизатором. Такая конструкция обуславливает необходимость подбора ленты растений льна с копированием ординат ее средней части. Для автоматизации указанных перемещений, повышения их точности и снижения утомляемости механизатора целесообразно оснащать машину системой автоматического управления [20]. При этом шупы 2 и управляемые ими контакты автоматической системы установлены на раме очесывающего аппарата 1.

Кроме того, при реализации первой фазы технологии двухфазной уборки следует уделять особое внимание формированию прямолинейных лент растений, что будет способствовать повышению точности их копирования и увеличению производительности подборщика-очесывателя. Для этого целесообразно использовать тербильки, способные выполнять принудительный растил ленты растений.

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлено, что чистота очеса Ч семенных коробочек со стеблей, зависит от параметров очесывающего аппарата, структурных параметров подбираемой ленты

растений и от ее расположения относительно гребней аппарата. Последний фактор обусловлен ошибками копирования ленты растений подбирающим аппаратом в горизонтальной плоскости. У подборщика-очесывателя с неподвижным очесывающим аппаратом чистота очеса в основном не будет отвечать агротребованиям из-за рассогласования в пространстве технологических зон B_{az} и B_{a7} , следствие случайных отклонений $y_0(t)$ подбирающего аппарата от ленты льна и систематической ошибки копирования ее кривизны.

Наибольшее количество семян будет отделено от стеблей при совпадении ординат середины активной зоны очесывающего аппарата и центра рассеивания количества семенных коробочек по зоне их возможного расположения на растениях в ленте. Уменьшить или исключить потери семян при работе машины можно путем исправления ошибок копирования кривизны ленты растений льна перед подачей в очесывающий аппарат путем применения разработанных усовершенствованных процессов подбора ленты растений с ориентированной ее подачей в очесывающий аппарат специальным устройством, подвижного очесывающего аппарата и системы автоматического управления взаимным расположением рабочих органов. Для уменьшения ошибок копирования следует также формировать прямолинейные ленты растений при реализации первой фазы технологии двухфазной уборки с помощью теребилок, способных выполнять принудительный расстил ленты.

Использование предложенных усовершенствованных технологических процессов и технических решений в комплексе позволит исключить отрицательное влияние случайного характера входных процессов на результаты очеса семенных коробочек и увеличить сбор семян при двухфазной уборке льна-долгунца.

Литература.

1. Основные проблемы научного обеспечения льноводства / Р.А. Ростовцев, В.Г. Черников, И.В. Ущиповский и др. // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т.14. №3. С. 45–52.
2. Dudarev I. A Review of Fibre Flax Harvesting: Conditions, Technologies, Processes and Machines // *Journal of Natural Fibers*. 2020. No. 12-22. P. 1–13.
3. Галкин А.В., Фадеев Д.Г., Ущиповский И.В. Исследование качественных характеристик льноволокна в зависимости от конструкции очесывающего аппарата // *Вестник Мордовского университета*. 2018. Т.28, №3. С.389–399.
4. Поздняков Б.А. Актуальные направления совершенствования системы машин для уборки льна-долгунца // *Техника и оборудование для села*. 2019. №8 (266). С. 2–6.
5. Dudarev I., Say V. Development of Resource-Saving Technology of Linseed Harvesting // *Journal of Natural Fibers*. 2020. Vol. 17. No. 9. P. 1307–1316.
6. Зинцов А.Н. *Обоснование и разработка процессов и машин для отдельной уборки льна-долгунца: дис....д-ра техн. наук*. М., 2008. 288 с.
7. Ростовцев Р.А., Черников В.Г. *Приоритеты в механизации современного льноводства // Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2016. № 5. С. 2–4.
8. Ковалев М.М., Перов Г.А., Просолов С.В. *Анализ работы делителей в трудных условиях уборки // Техника и оборудование для села*. 2020. №11 (281). С. 20–24.
9. *Снижение потерь семян в льнокомбайне / Р.А. Ростовцев, М.М. Ковалев, Д.Г. Фадеев и др. // Техника и оборудование для села*. 2017. № 7. С. 20–23.
10. Хайлис Г.А. *Теория льноуборочных машин*. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. 322 с.
11. Черников В.Г., Порфирьев С.Г., Ростовцев Р.А. *Очесывающие аппараты льноуборочных машин (теория, конструкция, расчет): монография*. М.: «Издательство ВИМ», 2004. 240 с.
12. Шевчук В.В. Динамічна модель взаємодії вальцового робочого органа з насінням олійних культур // *Сільськогосподарські машини: сб. наук. ст. Луцьк: РВВ Луцького НТУ*, 2015. вип. 31. С. 174–182.
13. Зинцов А.Н., Смирнов Н.А., Соколов В.Н. *Машины для отдельной уборки льна-долгунца. Подборщик – очесыватель ПОЛ-1,5К // Достижения науки и техники АПК*. 2007. № 7. С. 46–47.
14. Лурье А.Б. *Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов / 2-е изд. перераб. и доп.* М.: Колос, 1981. 382 с.
15. *Моделирование сельскохозяйственных агрегатов и их систем управления / под общ. ред. А.Б. Лурье*. Л.: «Колос». Ленингр. отд-ние, 1979. 312 с.
16. Черников В.Г. *Потери семян в зависимости от точности подачи ленты льна в камеру очеса // Достижения науки и техники АПК*. 2007. №4. С. 14-16.
17. Горлач Б.А. *Теория вероятностей и математическая статистика: учебн. пособие для вузов*. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 320 с.
18. Рагрин Н. *Математическая обработка экспериментальных данных*. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 618с.
19. Пат. 2141191 Российская Федерация, МКИ А01D 45/06 (1995.01). *Машина для отдельной уборки льна-долгунца / Н.А. Смирнов, В.А. Рожнов, М.М. Ковалев и др.; заявитель и патентообладатель Костр. гос. с.-х. акад., Центр. науч.-исслед., проектно-технол., конструкторский ин-т механиз. льноводства; № 98104372/13; заявл. 17.02.1988; опубл. 20.11.1999, Бюл. №32*.
20. Пат. 2193301 Российская Федерация, МПК А01D 45/06 (2000.01). *Устройство для принудительного расстила ленты к льноуборочным машинам / В.В. Зубанов, А.Н. Зинцов, М.М. Ковалев и др.; заявитель и патентообладатель Костр. гос. с.-х. акад.; № 99115863/13; заявл. 19.07.1999; опубл. 27.11.2002, Бюл. №33*.

Поступила в редакцию 15.11.2021.
После доработки 19.12.2021
Принята к публикации 14.01.2022

ГЕОМЕТРИЯ ПОСЕВА ПРОПАШНЫХ КУЛЬТУР*

А.А. Завражнов¹, кандидат технических наук, **А.И. Завражнов¹**, академик РАН, **А.А. Земляной¹**, **В.Ю. Ланцев¹**, доктор технических наук, **Д.В. Акишин¹**, кандидат сельскохозяйственных наук, **А.С. Ибраев²**, кандидат технических наук, **А.В. Якушев³**

¹Мичуринский государственный аграрный университет,
393760, Тамбовская обл., Мичуринск, ул. Интернациональная, 101
E-mail: aiz@mgau.ru

²Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана,
090000, Западно-Казахстанская обл., Уральск, ул. Жангир хана, 51
E-mail: ibraevadil2012@mail.ru

³Публичное акционерное общество «Миллеровосельмаш»
346130, Ростовская обл., г. Миллерово, ул. Заводская, 1
E-mail: info@msm161.ru

В мировой и отечественной практике при посеве пропашных культур используют сеялки точного высева (СТВ), обеспечивающие точный пунктирный посев семян. Отличительная особенность подавляющего большинства зарубежных и отечественных СТВ для пропашных культур – наличие опционного оборудования для внесения удобрений одновременно с высевом семян. Опция припосевного (стартового) внесения удобрений на сегодня – обязательная функциональная (потребительская) характеристика всех вновь разрабатываемых и реализуемых СТВ для пропашных культур. Современные СТВ могут обеспечить практически любую норму высева в необходимых геометрических сочетаниях (параметрах) с оптимальным размещением (раскладкой) семян на поле. Один из резервов повышения урожайности пропашных культур – увеличение числа растений на единицу площади при оптимизации размещения (раскладки) семян. Технические возможности производимых СТВ и появление новой системы машин позволяют эффективно проводить посев с узким междурядьем и сдвоенными рядами. Существующая технико-технологическая схема локально-ленточной заделки удобрений современных СТВ определяет их сплошное (непрерывное) внесение. Это сопровождается излишним расходом удобрений и затратами питательных веществ на рост и развитие сорняков, располагающихся в промежутках между семенами. Проведенные исследования позволили оптимизировать процесс посева пропашных культур с одновременным внесением припосевных (стартовых) удобрений путем их размещения по схеме «5×5×5» (на 5 см глубже семени, на 5 см в сторону от ряда растений, «очагами» размером 5 см), которая обеспечивает снижение нормы внесения и экономию удобрений в 2 раза и более. Предлагаемая схема реализована в техническом концепте, обозначенном как «высевающий аппарат для точного высева пропашных культур и локального дифференцированного внесения удобрений» (патент РФ №199944 от 29.09.2020), в котором высевающий аппарат СТВ выполнен совместно с дозирующим устройством для припосевных (стартовых) удобрений.

GEOMETRY OF SOWING AROUND CROPS

Zavrzhnov A.A.¹, Zavrzhnov A.I.¹, Zemlyanov A.A.¹, Lantsev V.Yu.¹, Akishin D.V.¹, Ibraev A.S.², Yakushev A.V.³

¹Michurinsk State Agrarian University,
393760, Tambovskaya obl., Michurinsk, ul. Internatsional'naya, 101
E-mail: aiz@mgau.ru

²Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhanqir Khan,
090000, Zapadno-Kazakhstanskaya obl., Ural'sk, ul. Zhanqir khana, 51
E-mail: ibraevadil2012@mail.ru

³Public Joint Stock Company «Millerovoselmash»
346130, Rostov region, Millerovo, st. Factory, 1
E-mail: info@msm161.ru

Abstract. In world and domestic practice, when sowing row crops, precision seeders (STS) are used, which provide accurate dotted sowing of seeds. A distinctive feature of the vast majority of foreign and domestic PTS for row crops is the availability of optional equipment for applying fertilizers simultaneously with sowing seeds. The option of pre-sowing (starter) application of fertilizers today is a mandatory functional (consumer) characteristic of all newly developed and implemented STS for row crops. Modern STS can provide almost any seeding rate in the required geometric combinations (parameters) with optimal placement (layout) of seeds on the field. One of the reserves for increasing the yield of row crops is to increase the number of plants per unit area while optimizing the placement (layout) of seeds. The technical capabilities of modern STV and the emergence of a new system of machines allow efficient sowing with narrow row spacing and double rows. The existing technical and technological scheme for the local-tape incorporation of modern STS fertilizers determines their continuous (continuous) application. This predetermines the excessive consumption of fertilizers and, as a result, the “feeding” of weeds in the intervals between seeds. The conducted studies allowed to optimize the process of sowing tilled crops with the simultaneous application of near-sowing (starter) fertilizers by placing them according to the «5x5x5» scheme (placement of fertilizers relative to the seed at a depth of 5 cm, away from the row of plants 5 cm and the focus (zone) of application 5 cm), which provides a reduction in the application rate and saves fertilizers by 2 times or more. The technological scheme «5x5x5» is implemented in a technical concept, designated as a «seeder for precision seeding of row crops and local differentiated fertilization» (RF patent No. 199944 dated 09.29.2020) fertilizers.

* Результаты исследований, представленные в статье, получены в рамках реализации Соглашения №075-11-2019-041 от 22 ноября 2019 г. между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и ПАО «Миллеровосельмаш» на выполнение НИОКТР по теме «Создание высокотехнологичного производства многофункциональных комплексов для посева и возделывания пропашных и овощных культур в системе «точного» и «нулевого» земледелия на базе интеллектуальных мехатронных модулей». НИОКТР выполняется в организации Головного исполнителя (ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ).

Ключевые слова: пропашные культуры, геометрия посева, узкое междурядье, двухрядная и равномерно распределенная раскладка, сеялки точного высева, локально-очаговое внесение припосевных (стартовых) удобрений.

По определению сельскохозяйственного энциклопедического словаря (СЭС), к пропашным культурам относят сельскохозяйственные растения, нормальный рост и развитие которых требуют больших запасов питательных веществ и влаги в почве, борьбы с сорняками болезнями и вредителями [1]. Это зерновые (кукуруза, соя и др.), технические (сахарная свекла, подсолнечник и др.), овощные и бахчевые (кабачки, баклажаны, кормовая свекла, арбузы, дыни и др.) культуры.

Агробиологические особенности пропашных культур требуют применения специального технического оснащения для их посева, возделывания и уборки. В мировой и отечественной практике при посеве пропашных культур используют, так называемые, сеялки точного высева (СТВ), обеспечивающие точный пунктирный посев семян (в рамках представленной работы под термином «посев» мы понимаем технологические, «высев» – технические аспекты операции посева пропашных культур) [2, 3].

Согласно определению ГОСТ 16265-89, под точным подразумевается посев строго определенного количества семян в рядке, обеспечивающий оптимальную площадь питания растений, под пунктирным – рядовой посев с одинарным равномерным распределением семян в рядках.

Отечественные нормативы (ГОСТ 31345-2017, СТО АИСТ 5.6-2018) разделяют сеялки точного высева на сеялки для пропашных культур (с фиксированной шириной междурядья 45, 60, 70, 75 и 90 см), сахарной свеклы (с фиксированной шириной междурядья 45 и 60 см), овощных (с шириной междурядья в соответствии с агротехническими требованиями для определенной культуры) и бахчевых культур (с фиксированной шириной междурядья 180 см).

Американские и некоторые европейские сеялки точного высева для пропашных культур имеют фиксированную ширину междурядья, выраженную в дюймовой системе мер. Так, известные американские фирмы John Deere (www.johndeere.com) и Great Plains (www.greatplainsint.com) выпускают СТВ с шириной междурядья 30'' (76,2 см), 36'' (91,4 см), 38'' (96,5 см) и 40'' (101,6 см).

Ширина междурядья СТВ – исторически сложившийся параметр, который, в свое время, был сформирован принятой технологией возделывания пропашных культур и техническими возможностями сеялок и других машин (системы машин) для выполнения сопутствующих технологических операций (например, уничтожение сорняков в междурядьях пропашными культиваторами, междурядное опрыскивание, комбайновая уборка и др.).

Отличительная особенность подавляющего большинства зарубежных и отечественных СТВ для пропашных культур – наличие опционального оборудования для внесения удобрений одновременно с высевом семян. Эта операция трактуется как припосевное (стартовое) внесение удобрений, обеспечивающее растения питательными веществами в начальный период вегетации, когда слабая корневая система не может в достаточном количестве усваивать их из почвы и основного удобрения, внесенного под вспашку или культивацию [4]. Опция припосевного (стартового) внесения удобрений одновременно с высевом семян – обязательная функциональная (потребительская) характеристика всех вновь разрабатываемых и реализуемых СТВ для пропашных культур [4, 5].

Основные атрибуты техники-технологического развития современного растениеводства – точность и эффективность. Они реализованы в системах точного и

Key words: row crops, sowing geometry, narrow row spacing, two-row and equally distributed layout, precision seeders, local focal application of pre-sowing (starting) fertilizers.

ресурсосберегающего (No-till, Strip-till и др.) земледелия. В системе пропашного земледелия для процедуры (операции) посева необходимо обеспечить точное (по количеству) и оптимальное (по ряду или площади) размещение семян на поле, для процедуры (операции) внесения припосевных (стартовых) доз удобрений – их локально-ориентированное дифференцированное размещение относительно высеянных семян.

Согласно определению ГОСТ 28718-2016, локальное внесение удобрения – это внесение, обеспечивающее его размещение в почве очагами различной формы (рядковое, ленточное, порционное). По определению ГОСТ Р 56084-2014, дифференцированное внесение удобрений – это внесение удобрений с переменной дозой, рассчитанной на основе анализа плодородия почв.

Многочисленными исследованиями доказано, что увеличение продуктивности (урожайности) сельскохозяйственных растений определяет интенсивность их развития и оптимальное размещение по площади поля, которые, в свою очередь зависят, от точности высева (заданного количества семян на единицу площади поля), равномерного распределения, высева на необходимую и одинаковую глубину, а также рационального размещения удобрений относительно семян [6, 7, 8]. Перечисленные факторы в первую очередь характеризуются геометрическими параметрами посева, которым в последние годы уделяют большое внимание. В научный и практический обиход описания процесса посева, стала вводиться специфическая геометрическая терминология, например, точность высева в 3D-формате (точность в трёх измерениях) или триангуляционное размещение семян (размещение в вершинах треугольников, примыкающих один к другому) и др.

Признавая факт важности оптимального взаимного расположения точного количества посеянных семян и внесенных припосевных (стартовых) удобрений, считаем целесообразным ввести параметр (термин), который трактуется как «геометрия посева» пропашных культур. В нашем понимании геометрия посева – это геометрические параметры посева сельскохозяйственных культур.

Цель исследования – анализ геометрических параметров посева пропашных культур с одновременным внесением припосевного (стартового) удобрения для разработки конкурентоспособных технико-технологических решений.

Методика. Методологической основой исследования послужило изучение геометрических параметров высева пропашных культур, которые обеспечивают современные СТВ с расчетом площади питания растений (без учета ее формы). Работу проводили на основании изучения протоколов испытаний региональных машинно-испытательных станций (МИС) в период 2012–2019 гг. (табл. 1) и отчетов производителей.

В исследованиях использовали математические модели определения площади питания растений с целью оптимизации нормы высева пропашных культур в зависимости от геометрических параметров посева семян и их раскладки на поле, с учетом внесения припосевных (стартовых) удобрений.

Результаты и обсуждение. Геометрическими параметрами посева пропашных культур служат следующие (ГОСТ 31345-2017, СТО АИСТ 5.6-2018): h – глубина посева (расстояние от поверхности почвы до высеянных семян), см; B – ширина междурядья (расстояние между центрами соседних рядков растений в одном проходе сеялки), см;

Табл. 1. Список протоколов испытаний сеялок точного высева (СТВ)

Номер протокола	Наименование МИС	Наименование и марка машины, страна-изготовитель
01-12-12	Алтайская	СТВ универсальная УПС-8-02, Украина
01-14-12	Алтайская	СТВ Caspardo SP Dorada 8F-70, Италия
01-16-13	Алтайская	СТВ Caspardo SP Dorada 8F-70, Италия
01-22-13	Алтайская	СТВ СТП-12 «РИТМ-1М»
01-23-13	Алтайская	СТВ Caspardo MT 8-70, Италия
01-37-13	Алтайская	СТВ прицепная Challenger SN 8108, США
03-08-13	Владимирская	СТВ пропашная ТС-М 8000А
03-12-13	Владимирская	СТВ пропашная SPP-8FS, Молдова
03-14-13	Владимирская	СТВ универсальная УПС-8-02, Украина
08-40-13	Поволжская	СТВ John deere DB-55, США
08-101-13	Поволжская	СТВ пропашная SPP-8, Молдова
08-89-14	Поволжская	СТВ KINZE 3700, США
01-13-14	Алтайская	СТВ пропашная «Maskar Maxi», Италия
03-10-14	Владимирская	СТВ пропашная МС-8
11-01-14	Северо-Кавказская	СТВ пропашная МС-8
11-02-14	Северо-Кавказская	СТВ пропашная МС-12
11-03-15	Северо-Кавказская	СТВ СТП-12 «РИТМ-1М»
01-08-15	Алтайская	СТВ пропашная «Maskar Maxi», Италия
01-09-15	Алтайская	СТВ Caspardo SP Dorada MT8-70, Италия
03-16-15	Владимирская	СТВ Caspardo SP8 Dorada, Италия
08-21-15	Поволжская	СТВ KINZE 3600, США
14-26-15	Центр.-Черноземная	СТВ Vaderstad Tempo TPF8
03-08-17	Владимирская	СТВ Caspardo SP/540 8 ROWS, Италия
11-02-17	Северо-Кавказская	СТВ пропашная МС-8
11-04-17	Северо-Кавказская	СТВ пропашная МС-12
01-17-18	Алтайская	СТВ Caspardo SP Dorado MT 8-70, Италия
03-14-18	Владимирская	СТВ Caspardo SP 8 R70 5800, Италия
08-11-18	Поволжская	СТВ VEGA-8. ПАО «Эльворти». Украина
12-10-18	Сибирская	СТВ пропашная ТС-М-4150А
01-18-18	Алтайская	СТВ пропашная МС-8
01-35-19	Алтайская	СТВ KUHN Maxima 2TRS, Франция
03-12-19	Владимирская	СТВ ТС-М-4150А
03-14-19	Владимирская	СТВ пропашная МС-8
11-08-19	Северо-Кавказская	СТВ пропашная МС-8
11-10-19	Северо-Кавказская	СТВ пропашная МС-12
08-09-19	Поволжская	СТВ KINZE 3000, США
08-13-19	Поволжская	СТВ СТП-12 «РИТМ-1М»
08-30-19	Поволжская	СТВ УПС-8-02, Украина

t – шаг посева (расстояние между двумя следующими одно за другим семенами в ряду), см; L – длина посева, пм/га; N – норма высева (количество семян, посеянных на единицу площади, шт./га, или единицу длины, шт./пм).

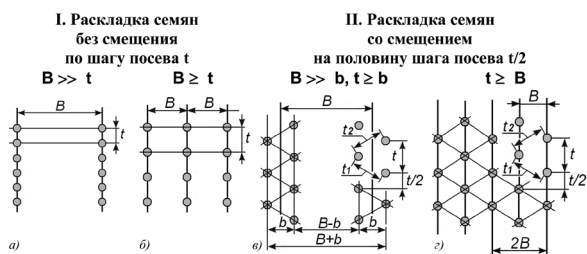


Рис. 1. Геометрия высева пропашных культур в 2D-формате: а – однорядная (однострочная) раскладка с широким междурядьем, б – однорядная (однострочная) раскладка с узким междурядьем, в – двухрядная (двухстрочная) триангуляционная раскладка, г – равномерно распределенная гексагональная раскладка.

Ранее основным параметром, используемым для оценки агротехнологической эффективности операций посева и возделывания пропашных культур была норма высева. Она формирует заданную густоту стояния растений, которая в свою очередь определяет продуктивность и урожайность. Отечественными нормативами (ГОСТ 31345-2017, СТО АИСТ 5.6-2018) установлено, что для пропашных культур норма высева составляет 1,4...8 шт./пм ($t = 71,4...12,5$ см), для сахарной свеклы – не более 6 шт./пм ($t = 16,7$ см), для бахчевых культур – 2...4 шт./пм ($t = 50,0...25,0$ см).

Сейчас для оценки агротехнологической эффективности кроме нормы высева используют геометрические параметры, определяющие рациональное (оптимальное) размещение (раскладку) растений на поле. В современном пропашном земледелии используют следующие четыре основные раскладки:

- однорядная (однострочная) с широким междурядьем (которая трактуется как традиционная или классическая);
- однорядная (однострочная) с узким междурядьем;
- двухрядная (двухстрочная, зарубежное название – Twin Row);
- равномерно распределенная.



Рис. 2. Посевы пропашных культур с различной раскладкой.

Первые две раскладки (рис. 1, а, б, рис. 2, а, б) относятся к так называемому тетрагональному типу, в котором семена располагаются в вершинах четырехугольников без смещения одно относительно другого по шагу посева в соседних рядах. Две остальные раскладки образованы путем смещения семян в соседних рядах одно относительно другого на половину шага посева (см. рис. 1, в, г, рис. 2, в).

Несмотря на достижения селекционной науки, основным резервом повышения урожайности пропашных культур по-прежнему остается увеличение количества растений на единице площади, определяемое нормой высева. Основные ограничения при ее увеличении – обеспечение требуемой площади питания и оптимальной густоты стояния растений [8]. Если необходимые условия питания можно сформировать путем внесения удобрений, то конкуренция растений за влагу и свет (при значительной густоте стояния) приводит к снижению их продуктивно-

($S_k = 907,5 \text{ см}^2$) и оптимальную геометрию размещения семян на площади поля ($t = 34 \text{ см}$) обеспечивает равномерно-распределенная гексагональная раскладка. Это заключение подтверждают результаты исследований различных авторов, которые утверждают, что при такой раскладке площади зон питания и равноудаленности растений одно от другого имеют максимальные значения [10, 13, 14].

Для различных раскладок при одинаковой норме высева соблюдается условие:

$$S_k' < S_k'' < S_k''' < S_k'''' \quad (1)$$

где S_k' , S_k'' , S_k''' и S_k'''' – площади питания соответственно при однорядной (однострочной) раскладке с широким междурядьем; однорядной (однострочной) раскладке с узким междурядьем; двухрядной (двухстрочной) триангуляционной раскладке; равномерно-распределенной гексагональной раскладке.

Как было отмечено, основным резервом повышения урожайности пропашных культур – увеличение нормы высева, в частности для кукурузы и подсолнечника с 30...50 тыс. шт./га до 100...150 тыс. шт./га. Увеличение нормы высева при однорядном посеве на узком междурядье или двухрядном посеве на стандартном междурядье позволяет повысить урожайность пропашных культур более чем на 10% [11]. Это стало возможным благодаря конструктивным изменениям современной системы машин для пропашного земледелия, позволяющим не ограничиваться стандартными междурядьями (70 см, 75 см, 90 см в метрической системе и 30'', 36'', 38'' в дюймовой системе), а проводить работы на зауженных междурядьях – от 38,1 см (15'') до 24,1 см (9,5'').

Уменьшение ширины междурядья и двухрядный посев с возможностью смещения семян по шагу в соседних рядах – одно из ключевых конструктивных и технических новаций в развитии СТВ для пропашных культур.

Табл. 2. Площади зон питания растений при различной раскладке и одинаковой норме высева, шт./га

Раскладка	Геометрические параметры высева					Площадь S_k , см^2
	В, см	t, см	L, шт./га	N		
				шт./пм	шт./га	
Однорядная (однострочная) раскладка с широким междурядьем	70	14	14285,71	7,1	101420	153,9
Однорядная (однострочная) раскладка с узким междурядьем	45	22	22222,22	4,5	101420	379,9
Двухрядная (двухстрочная) триангуляционная раскладка	70	28	14285,71	3,6	101420	615,4
Равномерная гексагональная раскладка	29	34	34482,76	2,9	101420	907,5

сти. По выражению Л.В. Фадеева, основная задача точной агротехнологии – не заставлять растения тратить энергию на борьбу между собой при увеличении их количества на единице площади [9, 10]. Решается она путем оптимизации геометрии размещения семян на засеваемой площади.

На сегодняшний день нет единой методики определения формы площади (зоны) питания растений в зависимости от их раскладки. Так, по данным фирмы Monosem (www.monosem-inc.com), формы площадей (зон) питания выглядят как фигуры неправильной формы, прилегающие одна к другой. Д. Шпаар и Л.В. Фадеев для равномерно-распределенной раскладки определяют формы площадей (зон) питания в виде правильных шестиугольников [10, 11]. Ряд исследователей определяют их в виде кругов [12].

В большинстве случаев площадь питания растений определяют (по принятой в растениеводстве практике) делением густоты стояния на единицу площади (10, ГОСТ 31345-2017, СТО АИСТ 5.6-2018). Расчетные данные (табл. 2) показывают, что при одинаковой норме высева традиционная (классическая) раскладка (наиболее нерациональна в плане площади питания ($S_k = 153,9 \text{ см}^2$) и загущенности растений в ряду ($t = 14 \text{ см}$)). Максимальную площадь питания

В табл. 3 представлены геометрические параметры высева пропашных культур, которые обеспечивают современные СТВ [9] с указанием площади зоны (без учета ее формы) питания растений S , которую рассчитывали по формулам:

$$S = 104 \times (104/N), \quad (2)$$

где S – площадь питания, см^2 ; $104^2 = 10800 \text{ м}^2$ – площадь, га; N – норма высева, шт./га;

исходя из этого для однорядной (однострочной) раскладки $S = Bt$; (3)

для двухрядной (двухстрочной) раскладки $S = Bt/2$; (4)

где B – ширина междурядья, см; t – шаг посева, см.

Зависимости (2)–(4) позволяют определить норму высева (шт./га) для любых геометрических параметров высева и выбранной раскладки растений на поле по следующим формулам:

для однорядной (однострочной) раскладки $N = 10^8/Bt$; (5)

для двухрядной (двухстрочной) раскладки $N = 2 \times 10^8/Bt$. (6)

Табл. 3. Геометрические параметры высева пропашных культур

Ширина междурядья (В), см (°)	Ширина ряда (b), см (°)	Расстояние между семенами в ряду (t), см (°)	Длина посева (L), пм./га	Норма высева (N)		Площадь зоны питания (S), см ²
				шт./пм	шт./га	
Однорядная (однорядная) «классическая» раскладка с широким междурядьем						
70,0	–	12,5...71,4	14285,71	1,4...8	20008...114286	875,0...4998,0
90,0	–	12,5...71,4	11111,11	1,4...8	15562...88889	1125,0...6426,0
Однорядная (однорядная) раскладка с узким междурядьем						
Геометрия высева от Monosem (www.monosem-inc.com). Ультра узкий ряд (UNR – <i>ultra narrow row</i>)						
24,1 (9,5°)	–	6,7...20,0	41493,78	5,0...15,0	70000...215000	160,7...482,0
Геометрия высева от Kinze (www.kinze.com)						
35,0	–	4,3...22,4	28571,42	4,5...23,2	127951...662689	150,5...784,0
Геометрия высева от John Deere (www.johndeere.com) и Great Plains (www.greatplainsint.com)						
35,0	–	3,9...82,6	28571,42	1,2...25,6	34590...732601	136,5...2891,0
38,1 (15°)	–	3,5...75,9	26246,72	1,3...28,6	34581...749906	133,4...2891,8
Геометрия высева от Kverneland (www.kverneland.com)						
37,5	–	5,0...46,0	26666,67	2,2...20,0	57971...533333	187,5...1725,0
Двухрядная (двухрядная) раскладка						
Геометрия высева от John Deere (www.johndeere.com) и Great Plains (www.greatplainsint.com). Система Twin Row						
76,2 (30°)	20,3 (8°)	23,4	13123,36	8,5	112165	891,6
91,4 (36°)	20,3 (8°)	23,4	10940,92	8,5	93512	1069,4
96,5 (38°)	20,3 (8°)	23,4	10362,69	8,5	88570	1129,1
Геометрия высева от Monosem (www.monosem-inc.com). Система Twin Row						
75,0	20,3 (8°)	31,2 (12,3°)	13333,33	6,4	85470	1170,0
76,2 (30°)	20,3 (8°)	31,2 (12,3°)	13123,36	6,4	84124	1188,7
80,0	20,3 (8°)	31,2 (12,3°)	12500,0	6,4	80128	1248,0
Геометрия высева от MaterMac (www.matermac.it). Система Twin Row						
53,0	22,0	26,0	18867,92	7,7	145138	689,0
70,0	22,0	26,0	14285,71	7,7	109890	910,0
75,0	22,0	26,0	13333,33	7,7	102564	975,0
Геометрия высева от Gaspardo (www.maschio.com). Система Quincoince						
75,0	25,0	26,0	13333,33	7,7	102564	975,0
Геометрия высева от Lemken (www.lemken.com). Система Delta Row						
75,0	12,5	29,6	13333,33	6,8	90090	1110,0
Равнораспределенная гексагональная раскладка						
Геометрия высева от Kverneland (www.kverneland.com). Система Geo Seed						
37,5	–	43,3	26666,67	2,3	61526	1623,8
Геометрия высева по Фадееву Л.В. [5, 6]						
40,0	–	45,0	25000,0	2,2	55556	1800,0
Геометрия высева по Шпаару Д. [7]						
29,0	–	34,0	34482,76	2,9	101420	986,0

На основании данных табл. 3 с использованием формул (5) и (6) были рассчитаны нормы высева пропашных культур в зависимости от геометрических параметров посева семян и их раскладки на поле (рис. 3, а) и от шага посева в диапазоне его изменения от 5,0 до 50,0 см (рис. 3, б). Результаты анализа этих данных свидетельствует, что конструкционные и технические возможности современных СТВ позволяют обеспечивать практически любую норму высева в необходимых геометрических сочетаниях (параметрах) и оптимальном размещении (раскладке) семян на поле.

Технический и конструкционный анализ изучаемых СТВ (см. табл. 3) выявил общую тенденцию: все технологические мероприятия, обеспечивающие повышение урожайности благодаря увеличению нормы высева и оптимизации геометрических параметров размещения семян на поле, выполнены на базе существующих высевающих секций, хорошо зарекомендовавших себя на широкорядном посеве.

Узкое междурядье и двоянные рядки (схема Twin Row) большинства СТВ формируются путем параллельной или параллельно-разнесенной фронтальной установки высе-

вающих секций сеялок. Однако такой (весьма практичный и может быть вполне рациональный) подход имеет свои ограничения и технические трудности при установке высевающих секций СТВ менее чем на 20,3 см (8°).

Также открытым остается вопрос о возможности симметричного позиционирования внесенных припосевных (стартовых) удобрений относительно семян. На этом аспекте акцентировал внимание Д. Шпаар [11], а также некоторые фирмы-разработчики, например, MaterMac (www.matermac.it).

Для решения такой проблемы была разработана СТВ Azurit 9 (рис. 4) фирмы Lemken (система Delta Row), у которой конструкционное и техническое исполнение высевающих аппаратов и секций позволяет проводить точный высева пропашных культур по двухрядной (двухрядной) схеме с шириной рядка 12,5 см с одновременным локально-ленточным внесением гранулированных стартовых удобрений по центру рядка (www.lemken.com). Основное ее преимущество заключается в возможности совместной работы с существующей системой машин для пропашного земледелия.

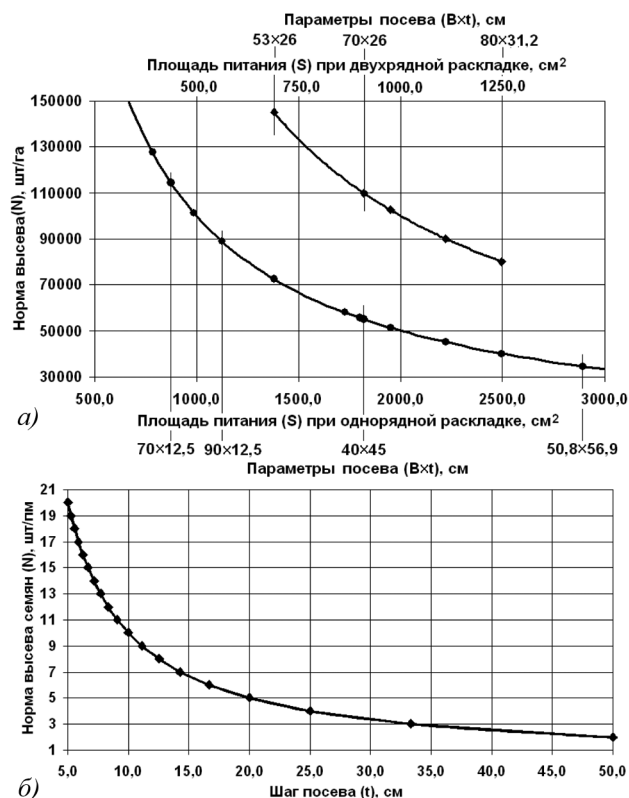


Рис. 3. Норма высева пропашных культур в зависимости:
а) от геометрических параметров посева семян и их раскладки на поле (шт./га); б) от шага посева (шт./м).

Основные технологические параметры внесения припосевных (стартовых) доз удобрений – норма внесения, определяемая их дозой (количество удобрений, внесенных за один прием), и позиционирование (схема размещения) относительно семян. Доза внесения гранулированного стартового удобрения (N) при посеве пропашных культур составляет 50...250 кг/га, в том числе под сахарную свеклу – N = 50...250 кг/га, под овощные культуры – 50...150 кг/га, под бахчевые – N = 30...350 кг/га (СТО АИСТ 5.6-2018). При этом схемы (способы) внесения отечественными нормативами не регламентированы.

Современная наука и практика определяет в качестве основной схемы (способа) внесения припосевных (стартовых) удобрений под пропашные культуры – локально-ленточную (рис. 5) [8, 14]. Большинство современных СТВ реализует локально-ленточное внесение гранулированных припосевных (стартовых) удобрений по схеме «ниже и в сторону» 2×2 дюйма, или 5×5 см (глубина внесения удобрений на 5 см ниже семян, со смещением на 5 см в сторону от рядка) (рис. 6). Такие параметры установлены с целью исключения солевого «ожога» семян [8].

Локализация удобрений ускоряет появление вторичных корней у пропашных культур. Происходит специализация отдельных зон корневой системы, что особенно важно для скороспелых сортов. Потребление влаги при локализации удобрений снижается на 10...15%, эффективность удобрений меньше зависит от погодных условий, а это особенно важно в земледельческих зонах, где в период всходы – кушение наблюдается дефицит влаги. Однако ленточное внесение удобрений предопределяет излишний расход удобрений, которые в том числе расходуются на рост сорняков, развивающихся в промежутках между семенами.

Для исключения солевого «ожога» при внесении припосевных (стартовых) доз гранулированных удобрений должно выдерживаться условие:

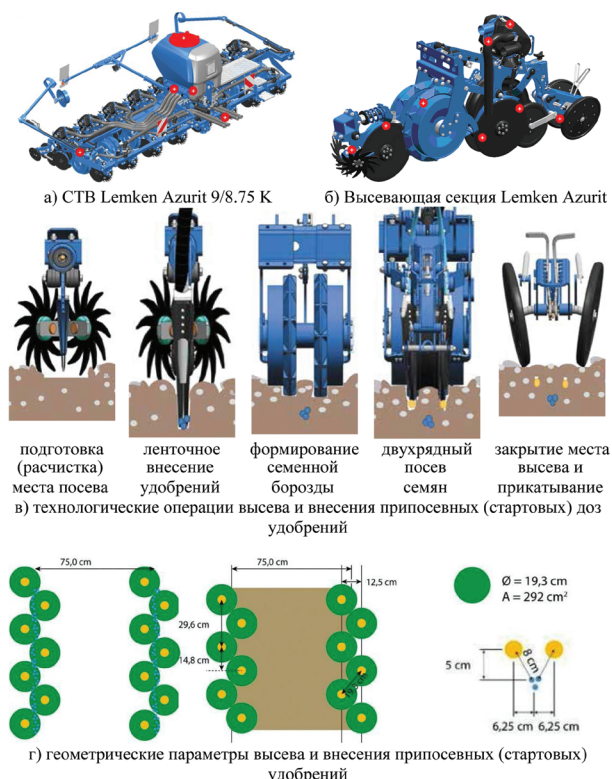


Рис. 4. СТВ Lemken Azurit 9 (система Delta Row), технико-технологический концепт.

$$r \geq 2'' (5 \text{ см}). \tag{7}$$

Сегодня активно внедряют так называемую технологию ультралокального внесения припосевных (стартовых) Рор-Ур удобрений по схеме In-Furrow (рис. 5, д). К Рор-Ур (анг. – выскакивающий, выпрыгивающий) удобрениям относятся микрогранулированные и жидкие высокочистые безбалластные стартовые удобрения с низким солевым индексом, а схема In-Furrow (анг. – в борозду) определяет их внесение в непосредственной близости от семян [8].

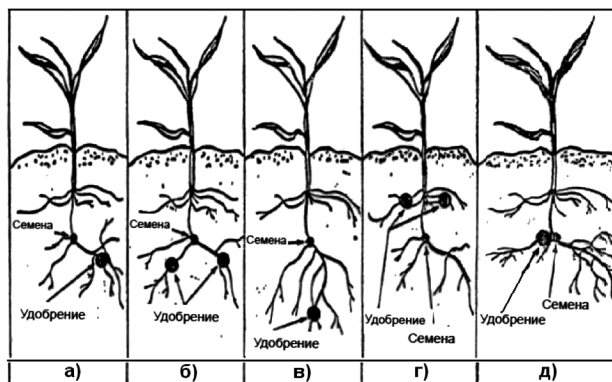


Рис. 5. Схемы (способы) локально-ленточного припосевного (стартового) внесения удобрений (по материалам [8]): а – с одной стороны от семян, б – с двух сторон от семян, в – ниже семян, г – выше семян (с одной или с двух сторон), д – в рядки с семенами (система In-Furrow).

Однако локально-ленточное внесение гранулированных припосевных (стартовых) удобрений по схеме «ниже и в сторону» с геометрическими параметрами 2×2 (5×5) остается наиболее распространенной, хотя и требует совершенствования (модернизации).

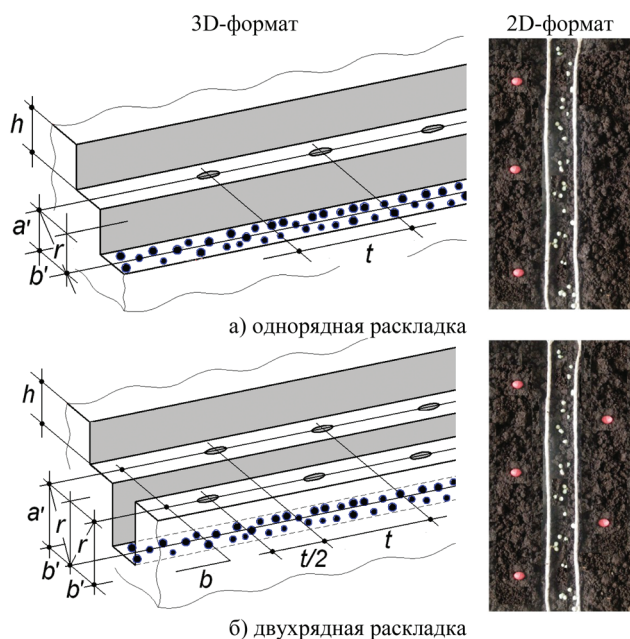


Рис. 6. Геометрические параметры посева семян пропашных культур с одновременным внесением гранулированных припосевных (стартовых) удобрений: h – глубина посева, t – шаг посева, b – ширина ряда, a' – глубина внесения удобрений ниже семян, b' – смещение удобрений от оси ряда семян; r – диагональ удаления удобрений от семян.

Точный высеv пропашных культур характеризуется определенным расстоянием (шагом посева) между семенами в пределах от 3,5 до 82,6 см и более (см. табл. 2). Существующая технико-технологическая схема локально-ленточной заделки удобрений современных СТВ определяет их сплошное (непрерывное) внесение (см. рис. 6).

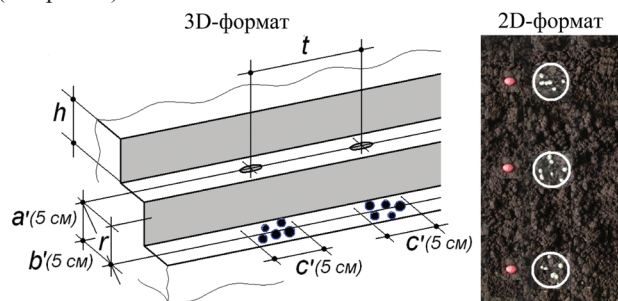


Рис. 7. Геометрические параметры посева семян пропашных культур с одновременным внесением гранулированных припосевных (стартовых) удобрений по схеме «5×5».

Авторы разработали технико-технологический концепт, определяющий локально-очаговый вариант внесения гранулированных припосевных (стартовых) удобрений, только в зоне нахождения семени очагом не более 5 см (рис. 7). Такая технико-технологическая схема определена как «5×5» (размещение удобрений на 5 см ниже семени, на 5 см в сторону от ряда растений «очагами» (зонами) 5 см).

Ее использование предопределяет значительную экономию гранулированных припосевных (стартовых) удобрений благодаря снижению нормы (дозы) их внесения. Расчеты показывают, что уже при шаге посева $t = 10$ см норма внесения удобрений уменьшается в 2 раза, или на 50 % (рис. 8).

Технологическая схема «5×5» реализована в техническом концепте, обозначенном как «высеvающий аппарат для точного высева пропашных культур и локального дифференцированного внесения удобрений» (патент РФ № 199944 от 29.09.2020 г.), в котором высевvающий аппарат СТВ выполнен совместно с дозирующим устройством для припосевных (стартовых) удобрений. Дозирующее устройство вносит определенную порцию удобрений одновременно с семенем и тем самым обеспечивает процесс точного посева семян пропашных культур с внесением припосевных (стартовых) удобрений.

Высевvающий аппарат для точного высевvа пропашных культур и локального дифференцированного внесения удобрений содержит семенной бункер 1 и бункер для удобрений 2, высевvающий диск 3 и барабан для дозирования удобрений 4, тукопроводы 9 для сошника внесения удобрений и семян (рис. 9). Высевvающий диск 3 смонтирован в семенном бункере 1 и одной стороной примыкает к вакуумной камере 5. Барабан дозатор удобрений 4 размещен на валу 6 высевvающего диска 3 и соединен с бункером удобрений 2.

Барабан дозатор удобрений 4 имеет ячейки 7 с установленными в них подвижными лопастями 8, обеспечивающими изменение объема ячейки благодаря приводу 10. Барабан дозатор удобрений 4 устанавливается на шлицевой вал высевvающего диска. В нем реализована возможность смещения ячеек семян и удобрений одна относительно другой, что позволяет обеспечить оптимальную схему внесения удобрений.

Технологический процесс высевvа пропашных культур и локального дифференцированного внесения удобрений осуществляется следующим образом. Перед началом работы устанавливается смещение ячеек семян относительно ячеек удобрений на заданный угол путем поворота барабана дозатора удобрений на шлицевом валу. В процессе работы аппарата семена из бункера 1 высевvающим диском 3 по одному подаются в тукопровод 9. Одновременно в барабан дозатор удобрений 2 подается питательная смесь,

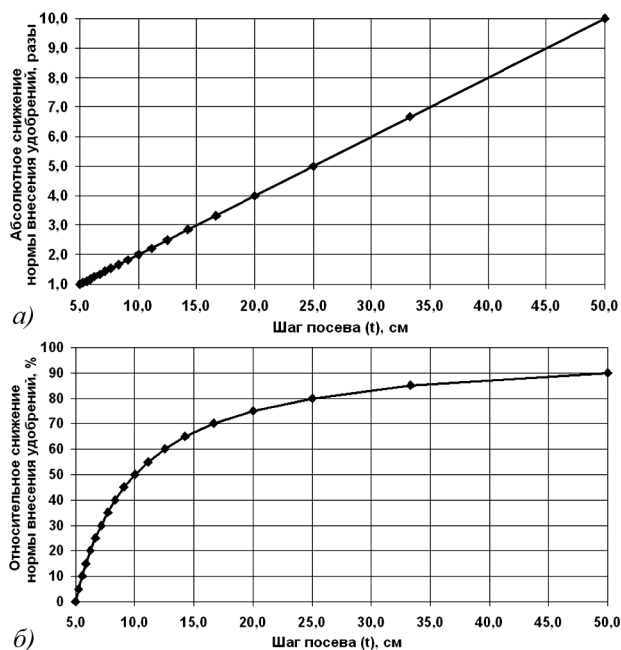


Рис. 8. Зависимость снижения нормы внесения удобрений от шага посева: а) в абсолютных единицах; б) в относительных единицах.

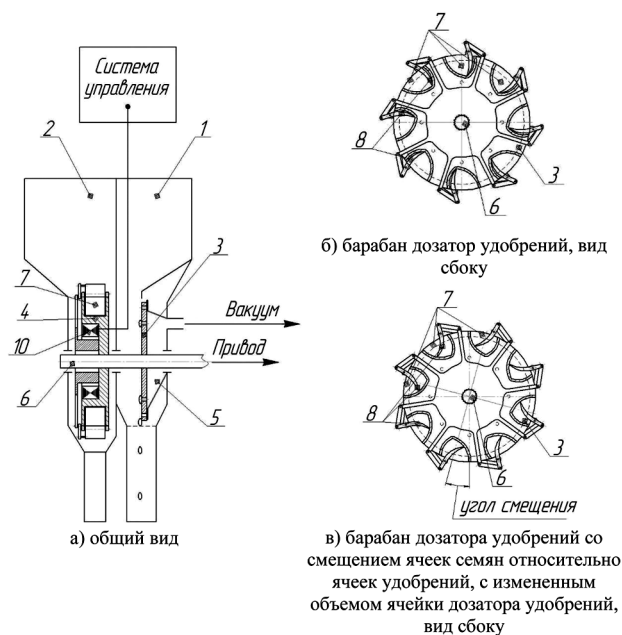


Рис. 9. Высевной аппарат для точного высева пропашных культур и локального дифференцированного внесения удобрений: 1 – семенной бункер, 2 – бункер для удобрений, 3 – высевной диск, 4 – барабан для дозирования удобрений, 5 – вакуумная камера, 6 – вал высевного диска, 7 – ячейки для удобрений, 8 – подвижная лопатка, 9 – тукопровод, 10 – управляемый привод.

при этом в зависимости от потребного количества удобрений изменяется объем ячеек 7 с помощью лопастей 8, управляемых приводом 10.

Таким образом, используемый на протяжении длительного периода времени параметр описания агротехнологической эффективности операций посева и возделывания пропашных культур «норма высева» в современных условиях недостаточен. С целью оценки количества высеянных семян, их взаимного расположения в почве между собой и с внесенными стартовыми удобрениями при посеве пропашных культур целесообразно ввести параметр «геометрия посева».

На сегодняшний день нет единой методики определения оптимальной формы площади питания растений в зависимости от их раскладки. При одинаковой норме высева максимальную площадь питания и оптимальную геометрию размещения семян на поле обеспечивает равномерно-распределенная гексагональная раскладка.

Одна из ключевых конструктивных и технологических новаций в развитии сеялок точного высева для пропашных культур – уменьшение ширины междурядья и двухрядный посев с возможностью смещения семян по шагу в соседних рядах. Современные СТВ обеспечивают возможность высева практически любой нормы семян в необходимых геометрических сочетаниях (параметрах) с их оптимальным размещением (раскладкой) на поле.

Существующая технико-технологическая схема локально-ленточной заделки удобрений современных СТВ определяет их сплошное (непрерывное) внесение. Это сопровождается излишним расходом удобрений и в итоге потреблением их питательных веществ сорняками, расположенными между культурными растениями. Для решения этой проблемы предложен новый технико-

технологический концепт, определяющий локально-очаговый вариант внесения гранулированных припосевных (стартовых) удобрений, то есть только в зоне нахождения семени очагом не более 5 см (схема «5×5×5»). Использование этой технологии позволяет экономить расход припосевного удобрения благодаря значительному снижению нормы его внесения.

Литература.

1. *Сельскохозяйственный энциклопедический словарь / под ред. В.К. Месяца и др. М.: Сов. Энциклопедия, 1989. 656 с.*
2. *Современное состояние и перспективы развития семеноводства в Российской Федерации / Ю.Ф. Лачуга, Ю.В. Плугатарь, А.И. Трубилин и др. // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2018. №72. С. 9–24.*
3. *Ценч Ю.С., Несмиян А.Ю., Хомутова Н.С. История развития конструкции высевных аппаратов зерновых сеялок // Вопросы истории естествознания и техники. 2020. Т. 41. №1. С. 106.*
4. *Несмиян А.Ю., Ценч Ю.С. Тенденции и перспективы развития отечественной техники для посева зерновых культур // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12. №3. С. 45–52.*
5. *Демчук Е.В., Союнов А.С. Совершенствование технологии возделывания сельскохозяйственных культур // Вестник ОмГАУ. 2016. № 2 (22). С. 242–246.*
6. *Гольятин В.Я. Анализ результатов испытаний сеялок и посевных комплексов прямого посева // Техника и оборудование для села. 2019. № 10 (268). С. 20–24.*
7. *Результаты производственных исследований зарубежного агрегата на посеве сои возделываемой по различным технологиям / А.И. Завражнов, А.Н. Зазуля, А.В. Балашиов и др. // Наука в центральной России. 2020. №1. С. 36–43.*
8. *Логина И. Стартовое удобрение: не навреди // АгроИндустрия. 2019. №2. С. 34–42.*
9. *Лачуга Ю.Ф., Шогенов Ю.Х., Ахалая Б.Х. Новая конструкция дозирующей системы пневматического высевного аппарата // Российская сельскохозяйственная наука. 2018. №3. С. 51–53.*
10. *Фадеев Л.В. Точная агротехнология будущего начинается сегодня. Кукуруза // Зернові продукти і комбікорми. 2016. Vol. 61. No. 1. С. 5–11.*
11. *Шнаар Д. Кукуруза: выращивание, уборка, хранение и использование. К.: Издательский дом «Зерно», 2012. 464 с.*
12. *Murray J.R., Tullberg J.N., Basnet B.B. Planters and their components: types, attributes, functional requirements, classification and description // ACIAR Monograph, 2006. 178p.*
13. *Evaluation of the efficiency of row-crop seeders using vacuum and extrabaric seed metering methods / V.I. Khizhnyak, V.V. Shchirov, A.Y. Nesmyan, et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. «International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production» 2021. С. 012045. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/659/1/012045> (дата обращения: 12.11.2021).*
14. *Rational parameter calculation method for devices with horizontal rotation axis to disseminate mineral fertilizers and seeds / V.A. Chernovolov, V.A. Kravchenko, L.V. Kravchenko, et al. // Amazonia investiga. 2018. Vol. 7. No. 17. P. 670–675.*

Поступила в редакцию 01.12.2021
После доработки 28.12.2021
Принята к публикации 27.01.2022

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАСОРЕННОСТИ ПОСЕВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ
МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ****В.К. Каличкин¹**, доктор сельскохозяйственных наук,**О.К. Альсова²**, кандидат технических наук,**К.Ю. Максимович¹**, аспирант,**Н.В. Васильева¹**, кандидат биологических наук

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, 630501, Новосибирская область, пос. Краснообск
E-mail: vk.kalichkin@mail.com

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20

Представлены результаты исследования по оценке влияния качественных факторов и метеорологических параметров на засоренность посевов. Выполнено построение прогнозной модели засоренности посевов на основе дерева решений в условиях ограниченной выборки. В ходе исследования использованы материалы длительных полевых опытов, проведенных в лесостепи Новосибирской области, и сведения о метеорологических параметрах Новосибирского поста метеонаблюдений за 1996–2018 гг. Для решения задач исследования применяли разные классы методов интеллектуального анализа данных, а именно непараметрические вероятностно-статистические методы, методы визуализации и метод деревьев решений. Выбор методов исследования обусловлен особенностями структуры и характера распределения исходных данных: несоответствие модели закону нормального распределения; сравнительно небольшой объем выборки; наличие как качественных, так и количественных предикторов; сложные нелинейные корреляционные связи между степенью засоренности посевов и метеорологическими параметрами. Выявлены качественные факторы, определяющие степень засоренности посевов: фон химизации, размещение культуры после пара, система обработки почвы и метеорологические параметры (среднедекадные температуры воздуха и осадки за период с 3-й декады апреля по конец мая). Выполнена оценка их вклада и статистической значимости. С использованием алгоритма CART построения дерева решений разработана модель прогноза засоренности посевов и сформулированы логические правила развития сорняков в зависимости от управляющих воздействий и агрометеоусловий. Точность модели характеризуется следующими показателями: MAE (средняя абсолютная ошибка) = 3,75; RMSE (среднеквадратичная ошибка) = 5,70 и R² (коэффициент детерминации) = 0,80. Построенный набор логических правил описывает структуру причинно-следственных связей и может быть использован в дальнейшем при создании экспертной системы поддержки принятия решений в растениеводстве.

APPLICATION OF MACHINE LEARNING TO FORECAST THE CONTAMINATION OF CROPS**Kalichkin V.K. ¹, Alsova O.K. ², Maksimovich K.Yu. ¹, Vasilyeva N. V. ¹**

¹Siberian Federal Research Center of Agricultural Biotechnology, Russian Academy of Sciences,
630501, Novosibirskaya obl., pos. Krasnoobsk
E-mail: vk.kalichkin@gmail.com

²Novosibirsk State Technical University,
630073, Novosibirsk, prosp. Karla Marksa, 20

The paper provides the results on evaluating the influence of qualitative factors and meteorological parameters on the crop infestation index. The prediction model of crops infestation has been built on the application of the decision tree method given limited samples of data. In research work using the materials of long-term field experiments of Siberian Research Institute of Farming and Chemistry of Agriculture – structural subdivision of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, carried out in the forest-steppe of Novosibirsk region and data on meteorological parameters of Novosibirsk weather observation station for 1996-2018. In order to meet the objectives of the study, different classes of data mining methods were used, such as nonparametric probabilistic-statistical methods, visualization methods, and decision tree methods. Selection of research methods was determined by the peculiarities of the structure and nature of the initial data distribution: nonconformity of the law of normal distribution model; sufficiently small sample size; multiple qualitative and quantitative predictors; complex nonlinear correlations between the crop infestation index and meteorological parameters. Qualitative factors determining the crop infestation index (use of chemicalization, crop placement after fallow, tillage system) and meteorological parameters (average ten-day air temperatures and precipitation during the period from the 3rd ten-day period of April to the end of May) have been identified. Their contribution and statistical significance were evaluated. Using the CART algorithm for building a decision tree, developed the model for crop infestation forecasting and formulated the logical rules of weed development depending on the controlling influences and agro-meteorological conditions. The accuracy of the model is characterized by the following indicators: MAE (Mean Absolute Error) = 3.75; RMSE (Root Mean Square Error) = 5.7 and R²(Coefficient of Determination/R Squared)= 0.8. The set of logical rules describes the structure of causal relationships in the data and can be used in the future to create a decision support system in crop production.

Ключевые слова: прогнозирование, непараметрические вероятностно-статистические методы, деревья решений, засоренность посевов, язык R.

Key words: forecasting, nonparametric probability-statistical methods, decision trees, crop infestation, R.

С распространением инновационных технологических решений в сельском хозяйстве возникает потребность в разработке прогностических инструментов, созданных совместно разработчиками программного обеспечения и исследователями из прикладных областей:

агрономии, защиты растений, агрохимии, экологии, которые могут быть использованы для оценки возможных рисков, обоснования экономической эффективности используемых агроприемов и принятия решений в области сельского хозяйства [1, 2, 3].

Способность предвидеть развитие вредных организмов, оценить возможные риски потери урожайности и оперативно принять взвешенное решение обосновывает актуальность поиска и применения эффективных методов прогнозирования в сельском хозяйстве [4, 5, 6]. Создание предиктивных моделей агросистем осложняется наличием нелинейных взаимосвязей между входными факторами и результирующими показателями, большим количеством предикторов при сравнительно малом количестве наблюдений, практической сложностью проведения многофакторных экспериментов [7, 8, 9]. Оптимизационные и биофизические модели имеют ограниченное применение, поскольку требуют большого объема входных данных [10, 11, 12]. Необходим поиск качественно новых подходов к оценке рисков и управлению посевами, которые основаны на современных разработках в области информационных технологий [13].

Одним из таких подходов может стать метод дерева решений – графическое представление логических правил развития процесса в зависимости от складывающихся условий (сочетание действующих факторов), демонстрирующий альтернативные варианты развития событий [14, 15, 16].

Визуально представленная логическая модель, позволяет объяснять варианты развития событий и исследовать вероятные последствия выбора их сочетаний [17]. Все это открывает возможности для анализа рисков в сочетании с каждым вариантом складывающихся условий. Формализация предметной области на логическом уровне демонстрирует высокие показатели достоверности при ограниченном количестве влияющих факторов и без «погружения» в биофизические свойства исследуемого объекта [13]. Дерево решений – это инновационный инструмент в сельском хозяйстве, который уже применяют по таким направлениям, как моделирование эрозийных процессов [18], оценка засоленности почвы [19], определение болезней [20], прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур [21, 22, 23].

Сельскохозяйственной наукой и практикой накоплено большое количество информации, которая содержит в себе сформированные и устоявшиеся знания, но их практическая реализация на основе инженерии знаний – актуальная проблема методического характера. Разработка моделей, приближенных к логическим рассуждениям человека, и их использование в построении систем поддержки принятия решений – одно из современных направлений цифровизации сельского хозяйства. Становится возможным использование метода деревьев решений для частных задач в области растениеводства [24]. Так, прогнозирование засоренности посевов потенциально позволит помочь в принятии обоснованных решений по выбору агротехнологий и эффективному применению средств защиты растений, что выступает одним из ключевых вопросов управления агрофитоценозом.

Цель исследования – построение прогнозной модели засоренности посевов на основе применения метода дерева решений в условиях ограниченной выборки.

Методика. В работе использованы данные по засоренности посевов яровой пшеницы длительных полевых опытов СибНИИЗиХ – структурного подразделения СФНЦА РАН, расположенных в Новосибирской области, р.п. Краснообск, за 1996–2018 гг. В качестве факторов, влияющих на формирование уровня засоренности посевов, рассматривали фон применения средств химизации – экстенсивный (Э), интенсивный (И); систему обработки почвы – ежегодная вспашка на глубину 20...22 см (В), безотвальная глубокая обработка на глубину 20...22 см (БГ), минимальная плоскорезная обработка на глубину 10...12 см (М), без основной обработки почвы (БО); размещение

после пара – первая культура (1), вторая (2), третья (3). На интенсивном фоне азотные удобрения вносили ежегодно в дозе N_{90} перед посевом, фосфорные – в дозе P_{120} один раз за ротацию севооборота в паровом поле. По вегетации применяли баковую смесь гербицидов против однодольных и двудольных сорных растений (в фазе кушения), фунгициды против болезней (в фазе флаг-листа) и инсектициды по ситуации. На экстенсивном фоне удобрения и пестициды не использовали.

Исследования проводили в севообороте пар – озимая рожь – яровая пшеница – яровая пшеница. После 2007 г. озимую рожь заменили яровой пшеницей. Сорная растительность на опытном поле была представлена 30 видами, относящимися преимущественно к типичным для лесостепной зоны. Большую часть сорного фитоценоза составляли мягликовые (злаковые) виды – просо куриное и посевное (*Echinochloa crusgalli* (L.), *Panicum miliaceum* L.), щетинники сизый и зеленый (*Setaria viridis* L., *S.pumila* (Po: ret) Schultes). В разные годы доля мягликовых от общей фитомассы сорных растений достигала 73...84 %. Двудольные сорные растения представлены большей частью однолетними ранними и поздними яровыми. Наиболее распространены были щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus* L.), пикульник двунадрезанный (жабрей) (*Galeopsis bifida* Boenp.), паслен черный (*Solanum nigrum* L.), липучка щетинистая (*Lappula squarrosa* (Retz.) Dum.), подмаренник цепкий (*Galium aparine* L.) и различные виды семейства гречишные (*Fagopirum tataricum* (L.), *Persicaria lapathifolia* (L.) S.F.Gray, *P. hydropiper* (L.), *Fallopia convolvulus* (L.). Многолетние виды выюнок полевой (*Convolvulus arvensis* L.), бодяк щетинистый (*Cirsium setosum* (Willd.) Bess.) и осот полевой (*Sonchus arvensis* L.) встречались в основном на экстенсивном фоне и на их долю приходилось не более 0,3 % сорного фитоценоза.

В исследовании использовали данные по метеорологическим показателям Новосибирского поста метеонаблюдений, расположенного вблизи г. Новосибирска, а именно, среднесуточные температуры воздуха за декаду (°C), сумма осадков (в мм) за 3-ю декаду апреля и 1...3 декады мая, а также суммы среднесуточных температур воздуха и осадков за эти же периоды (<http://www.pogodaiklimat.ru>).

В ходе работы применяли вероятностно-статистические методы и критерии для исследования законов распределения данных (критерий согласия Шапиро-Уилка [14]), выявления факторов, влияющих на показатель засоренности посевов и оценки их вклада (непараметрический критерий Краскела-Уоллиса [15], ранговый коэффициент корреляции Спирмена). Для прогнозирования степени засоренности посевов была построена модель дерева решений с использованием алгоритма CART [16]. Оценку точности и оптимизацию модели выполняли с использованием 10-кратной 10-блочной кросс-проверки. Для графического представления структуры исходных данных и результатов анализа применяли методы визуализации (построение диаграмм размаха, гистограмм, деревьев решений).

Всего в выборке было представлено 528 значений засоренности посевов (в % от фитомассы надземной части посевов) яровой пшеницы и обуславливающих ее факторов. Для качественной характеристики засоренности посевов вводили показатель уровня относительной засоренности (полученный в эксперименте), принимающий значение одной из 4 категорий соотношения с экономическим порогом вредности (ЭПВ = 10 % от фитомассы надземной части посевов): 1 – существенно ниже ЭПВ (менее 10 %), обработка посевов гербицидами не требуется; 2 – в пределах ЭПВ (10 % ± 1 %), обработка гербицидами по ситуации (учитывая погодные условия); 3 – существенно выше ЭПВ (более 10 %), гербицидная обработка обязательна, 4 – эк-

Табл. 1. Статистические характеристики показателя засоренности посевов

Фактор	Значение фактора	Статистические характеристики				
		число наблюдений	среднее	среднеквадратическое отклонение	минимальное значение	максимальное значение
Фон применения средств химизации	И	264	2,0	2,5	0,0	17,9
	Э	264	16,8	14,3	0,1	67,0
Культура после пара	1	176	4,0	5,5	0,0	31,2
	2	176	8,6	10,8	0,0	50,9
	3	176	15,6	16,4	0,1	67,0
Система обработки почвы	БГ	132	8,6	12,0	0,0	58,1
	БО	132	12,1	14,8	0,1	67,0
	В	132	6,8	9,9	0,0	42,7
	М	132	10,1	13,0	0,0	54,4

тремальный уровень превышения ЭПВ, при котором возможны значительные потери урожая (более 25 %).

Все расчеты выполняли средствами языка R в среде статистического анализа данных R-Studio.

Результаты и обсуждение. Для изучения структуры данных и обоснованного выбора методов исследования был проведен анализ характера распределения показателя засоренности посевов по всей выборке и по подвыборкам, сформированным при конкретном значении качественного фактора (система обработки почвы, фон химизации, культура после пара).

Распределение показателя засоренности посевов значительно отличалось для экстенсивного и интенсивного фонов (табл. 1). На экстенсивном фоне соответствующие статистические характеристики примерно в 8 раз выше, чем на интенсивном.

Выполнена проверка гипотезы о соответствии показателя засоренности модели закона нормального распределения (ЗНР). Визуально распределения не согласуются с моделью ЗНР, имеют ярко выраженную асимметрию (рис. 1). Гипотеза о ЗНР показателя засоренности посевов отвергается при использовании критерия согласия Шапиро-Уилка (p -значение $< 0,05$). Аналогичные результаты были получены по всем сформированным подвыборкам исследуемого показателя.

Выявлены значительные отличия в статистических характеристиках засоренности посевов, вычисленных при разных значениях качественных факторов (фон химизации, культура после пара). Разница в статистических характеристиках засоренности посевов в зависимости от

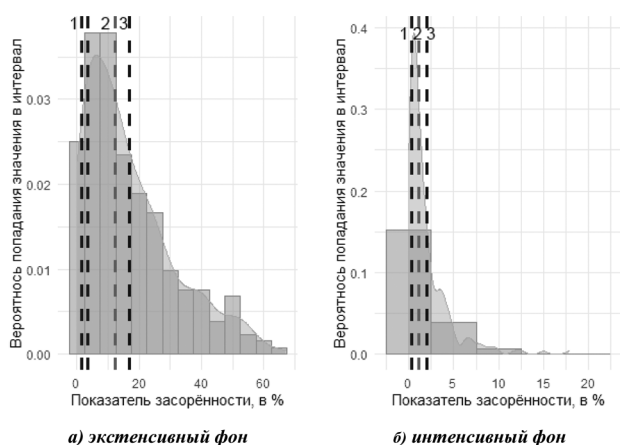


Рис. 1. Гистограмма показателя засоренности посевов с наложением аппроксимирующей функции плотности распределения вероятностей: 1 – мода, 2 – медиана, 3 – среднее.

года проведения исследований и используемой системы обработки почвы сравнительно меньше, чем от фона химизации и удаленности культуры от пара (рис. 2). Для подтверждения предварительных выводов о наличии и степени влияния качественных факторов на формирование уровня засоренности посевов был использован непараметрический критерий Краскела-Уоллиса. Выбор критерия обусловлен характером распределения показателя засоренности посевов (отклонена гипотеза о нормальном распределении) и сравнительно небольшим объемом исходных данных. В результате применения критерия Краскела-Уоллиса выявлена статистически значимая связь между засоренностью посевов и фоном химизации ($p < 0,00001$), размещением

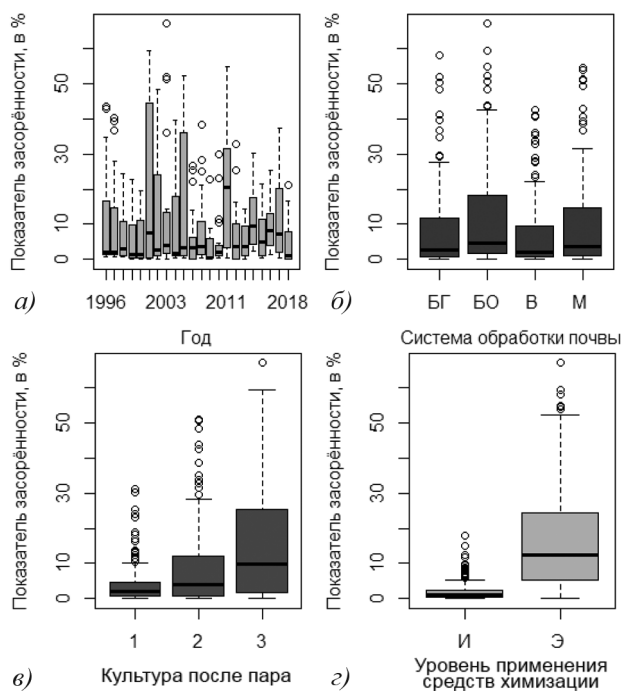


Рис. 2. Диаграммы размаха показателя засоренности посевов в зависимости от значений качественного фактора: а) год; б) система обработки почвы; в) культура после пара; г) фон химизации (положение центральной линии определяет медиану, границы прямоугольника соответствуют нижнему и верхнему квартилям, высота прямоугольника – значение интерквартильного размаха (ИКР), положение верхнего (нижнего) «уса» диаграммы определяется как сумма верхнего (нижнего) квартиля и величины $1,5 \times \text{ИКР}$, либо соответствует максимальному (минимальному) значению. Значения за пределами «усов» могут быть аномальными выбросами).

культуры после пара ($p < 0,00001$), системой обработки почвы ($p < 0,0005$), а также особенностями года исследований ($p < 0,0001$).

Наибольший уровень засоренности посевов выявлен на 3 культуре после пара и без обработки почвы (см. табл. 1). Связь засоренности с размещением культуры в севообороте была прямой – чем дальше культура расположена от пара, тем выше засоренность. Это объясняется накоплением семян однолетних сорных растений и многолетних корнеотпрысковых сорняков в пахотном слое почвы по мере удаления от парового поля. Наиболее явно зависимость наблюдается на экстенсивном фоне без применения гербицидов. На интенсивном фоне тенденция также сохраняется, хотя проявляется в меньшей степени. На заключительной культуре севооборота отмечена максимальная засоренность посевов по всем вариантам обработки почвы.

Отмечено значительное влияние системы обработки почвы на засоренность посевов. Безотвальная обработка (БГ и М) способствовали накоплению на поверхности почвы семян сорных растений, которые весной в массе прорастали в последующей культуре. В варианте со вспашкой засоренность была минимальной, так как оборот пласта способствует попаданию семян сорняков в нижние слои пахотного горизонта, где большая часть их погибает. Кроме того, при вспашке уничтожается значительная часть многолетних сорных растений. Отсутствие обработки почвы (вариант БО) способствует увеличению засоренности.

Связь показателя засоренности посевов и года исследований подтверждает гипотезу о его зависимости от метеорологических условий. Для оценки связи между уровнем засоренности посевов и метеорологическими показателями использовали ранговый коэффициент корреляции Спирмена, который не требует выполнения условия нормального распределения исходных данных и может быть использован для получения корректных выводов о наличии и силе связи между исследуемыми количественными показателями.

Выявлено наличие слабой корреляционной линейной связи между уровнем засоренности посевов и метеорологическими показателями (табл. 2): статистически значимые положительные связи на экстенсивном фоне химизации выявлены только с температурой воздуха в 3-й декаде мая и суммарной температурой воздуха за период с 3-й декады апреля по конец мая, отрицательная статистически значимая связь – с осадками за 3-ю декаду апреля; на интенсивном фоне химизации отмечена статистически значимая связь только с осадками в 3-й декаде апреля. Такой результат может свидетельствовать как об отсутствии сильных корреляций

между исследуемыми факторами, так и о более сложном нелинейном характере их связи, для описания которого необходимо применение методов других классов.

Исходя из полученных результатов анализа характера распределения и взаимосвязей данных, для построения прогнозной модели был выбран метод дерева решений. При его выборе учитывали небольшой объем выборки, наличие как качественных, так и количественных предикторов, значительные отклонения распределения показателя засоренности посевов от закона нормального распределения. Кроме того, дерево решений часто позволяет построить сравнительно точную прогнозную модель при отсутствии сильных линейных корреляций между целевым показателем (степень засоренности посевов) и предикторами, как в нашем случае.

Дерево решений графически представляет собой логическую модель взаимосвязи степени засоренности культуры, качественных факторов и метеорологических показателей (рис. 3). Каждый узел дерева показывает прогнозируемое значение степени засоренности посевов (в %), число наблюдений в узле и долю наблюдений от общего количества (в %).

Система обработки почвы не была выделена в качестве значащего фактора в прогнозной модели, что объясняется высоким комплексным вкладом факторов «фон интенсификации», «культура после пара» и выделенных метеорологических показателей в формирование засоренности посевов. В результате включение в модель данных по засоренности в зависимости от системы обработки почвы не приводит к статистически значимому улучшению показателей ее точности.

Минимальное количество сорного компонента наблюдается на интенсивном фоне (лист дерева 2). Наименьший уровень засоренности посевов формируется по 1-й культуре после пара и равен 6,6 % на экстенсивном фоне (лист дерева 12). По 2-й культуре после пара доля сорняков в общей биомассе посевов увеличивается с 10 % до 35 % (листья 21, 54, 55). Регулирующим фактором в варианте размещения пшеницы 2-й культурой после пара на экстенсивном фоне выступают осадки 1-й декады мая, которые способствуют значительному увеличению биомассы сорняков (лист 55). Наибольшая доля сорной растительности (45%) достигается при среднесуточной температуре воздуха за вторую декаду мая выше 9,5 °С и сумме осадков выше 12 мм (лист дерева 61). Фактором, значительно лимитирующим рост и развитие сорняков на 3-й культуре после пара на экстенсивном фоне, была среднесуточная температура воздуха за 2-ю декаду мая ниже 9,5 °С.

Табл. 2. Результаты расчета коэффициента корреляции Спирмена

Показатель	Экстенсивный фон		Интенсивный фон	
	значение коэффициента	p-значение	значение коэффициента	p-значение
Среднесуточная температура воздуха за:				
3 декаду апреля	-0,02	>0,05	0,06	>0,05
1 декаду мая	0,10	>0,05	0,03	>0,05
2 декаду мая	0,09	>0,05	-0,05	>0,05
3 декаду мая	0,13	<0,05	0,04	>0,05
Сумма осадков за:				
3 декаду апреля	-0,18	<0,05	-0,16	<0,05
1 декаду мая	-0,06	>0,05	-0,11	>0,05
2 декаду мая	0,06	>0,05	-0,08	>0,05
3 декаду мая	-0,04	>0,05	0,01	>0,05
Сумма среднесуточных температур воздуха за период (с 3-ей декады апреля по конец мая)	0,15	<0,05	-0,02	>0,05
Сумма осадков за период (с 3-ей декады апреля по конец мая)	-0,06	>0,05	0,05	>0,05

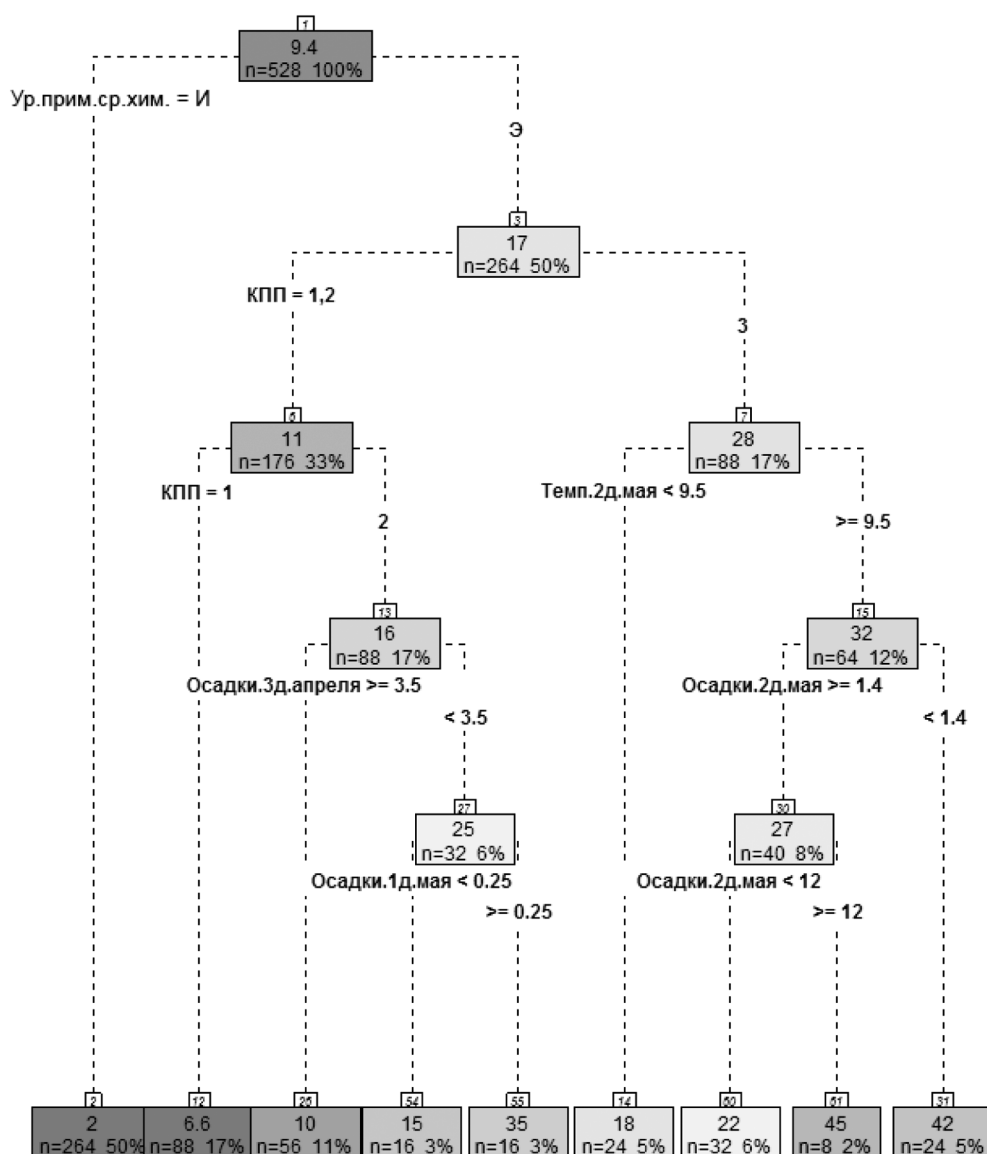


Рис. 3. Дерево решений для прогнозирования показателя засоренности посевов.

По полученным результатам можно заключить, что количество атмосферных осадков существенно влияет на засоренность посевов яровой пшеницы. При этом максимальное воздействие оказывают осадки и температура в период посева и всходов (май), когда культурные и сорные растения только формируются. Высокая температура воздуха способствует более быстрому росту яровой пшеницы, что дает возможность ей занять площадь питания и подавить прорастающие сорные растения. В период от фазы кушения до уборки (июнь–август) зависимость засоренности от атмосферных осадков значительно слабее, так как сформировавшаяся масса растений пшеницы препятствует росту сорняков и появлению их новых всходов.

Показатели точности модели дерева решений составили: MAE (средняя абсолютная ошибка) = 3,75; RMSE (среднеквадратичная ошибка) = 5,70 и R² (коэффициент детерминации) = 0,80.

На основе построенного дерева решений можно сформулировать наиболее значимые логические правила, которые дают возможность прогнозировать степень засоренности посевов яровой пшеницы.

если фон химизации экстенсивный и первая культура после пара, то показатель засоренности посевов равен 6,6%;

если фон химизации экстенсивный, 2 культура после пара и сумма осадков 3 декады апреля выше 3,5 мм, то показатель засоренности посевов равен 10%;

если фон химизации экстенсивный, 3 культура после пара и среднесуточная температура воздуха 2 декады мая ниже 9,5 °С, то показатель засоренности посевов равен 18%;

если фон химизации экстенсивный, 3 культура после пара, среднесуточная температура воздуха 2 декады мая выше 9,5 °С и сумма осадков 2 декады мая выше 12 мм, то показатель засоренности посевов равен 45%.

Таким образом, по результатам изучения разных классов методов интеллектуального анализа данных, как непараметрических вероятностно-статистических, так и построения логической модели (набор правил «если – то»), установлено, что для прогнозирования изменения показателя засоренности посевов лучше всего подойдет метод дерева решений. Такой выбор обусловлен особенностями структуры и характера распределения исходных данных: несоответствие

модели закону нормального распределения; сравнительно небольшой объем выборки; наличие как качественных, так и количественных предикторов; сложные нелинейные корреляционные связи между степенью засоренности посевов и метеорологическими показателями.

К основным факторам, определяющим засоренность посевов яровой пшеницы, относятся: фон интенсификации, удаленность культуры от пара, а также среднедекадные температуры воздуха и осадки за период с 3-ей декады апреля по конец мая.

Литература.

1. *Agriculture in 2050: recalibrating targets for sustainable intensification* / M. C. Hunter, R. G. Smith, M. E. Schipanski, et al. // *Bioscience*. 2017. Vol. 67. No. 4. P. 386–391. doi: 10.1093/biosci/bix010.
2. *Climate smart agriculture, farm household typologies and food security: An ex-ante assessment from Eastern India* / S. Lopez-Ridaura, R. Frelat, M. T. van Wijk, et al. // *Agricultural systems*. 2018. Vol. 159. P. 57–68. doi: 10.1016/j.agsy.2017.09.007
3. *Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges* / Z. Zhai, J. F. Martinez, V. Beltran, et al. // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 170. P. 105256. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919316497?via%3Dihub> (дата обращения: 12.10.2021), doi: 10.1016/j.compag.2020.105256.
4. Köksal Ö., Tekinerdogan B. *Architecture design approach for IoT-based farm management information systems* // *Precision Agriculture*. 2019. Vol. 20. No. 5. P. 926–958. doi: 10.1007/s11119-018-09624-8.
5. *IoT and agriculture data analysis for smart farm* / J. Muangprathub, N. Boonnarn, S. Kajornkasirat, et al. // *Computers and electronics in agriculture*. 2019. Vol. 156. P. 467–474. doi: 10.1016/j.compag.2018.12.011.
6. *A systems approach to forecast agricultural land transformation and soil environmental risk from economic, policy, and cultural scenarios in the north central United States (2012–2062)* / B. L. Turner, M. Wuellner, T. Nichols, et al. // *International Journal of Agricultural Sustainability*. 2017. Vol. 15. No. 2. P. 102–123. doi: 0.1080/14735903.2017.1288029.
7. *Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture* / A. Walter, R. Finger, R. Huber, et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017. Vol. 114. No. 24. P. 6148–6150. doi: 10.1073/pnas.1707462114.
8. *Big data analytics and precision animal agriculture symposium: Machine learning and data mining advance predictive big data analysis in precision animal agriculture* / G. Morota, R. V. Ventura, F. F. Silva, et al. // *Journal of animal science*. 2018. Vol. 96. No. 4. P. 1540–1550. doi: 10.1093/jas/sky014.
9. Кравченко Ю. А., Лежебоков А. А., Запорожец Д. Ю. *Способы интеллектуального анализа данных в сложных системах* // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2012. № 3. С. 52–57.
10. Кремер Н. Ш. *Теория вероятностей и математическая статистика как фундамент новой комплексной прикладной дисциплины «анализ данных»* // *Современная математика и концепции инновационного математического образования*. 2019. Т. 6. № 1. С. 333–337.
11. Хворова Л. А., Топаж А. Г. *Построение моделей агро-экосистем и их адаптация к конкретным условиям* // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика, телекоммуникации и управление*. 2011. № 1 (115). С. 99–105.
12. *Использование динамической модели агроэкосистемы для оценки влияния климатических изменений на продуктивность посевов (теория и реализация)* / Р. А. Полуэктов, А. Г. Топаж, В. П. Якушев и др. // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2012. № 2. С. 7–12.
13. *Имитационная модель агроэкосистемы как инструмент теоретических исследований* / В. Л. Баденко, А. Г. Топаж, В. В. Якушев и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. № 3. С. 437–445.
14. *Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: монография* / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов и др. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 888 с.
15. Kruskal W. H., Wallis W. A. *Use of ranks in one-criterion variance analysis*. // *Journal of the American Statistical Association*. 1952. Vol. 47. No. 260. P. 583–621.
16. *Classification and regression trees* / L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen, et al. Monterey, CA: Wadsworth & Brooks / Cole Advanced Books & Software. 1984. 368 p. doi: 10.1201/9781315139470.
17. Орлов А. И. *Новая парадигма прикладной статистики* // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т. 78. № 1–I. С. 87–93.
18. Gayen A., Pourghasemi H. R. *Spatial modeling of gully erosion: a new ensemble of CART and GLM data-mining algorithms* // *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*. Elsevier. 2019. P. 653–669. doi: 10.1016/B978-0-12-815226-3.00030-2.
19. *Засолённые почвы Венгрии: прогноз распространения на основе гидрогеологических карт* / Т. Том, Л. Пастор, Ш. Кабош и др. // *ББК 40.3. Э 40*. 2009. С. 116–158.
20. *Detection and classification of citrus diseases in agriculture based on optimized weighted segmentation and feature selection* / M. Sharif, M. A. Khan, Z. Iqbal, et al. // *Computers and electronics in agriculture*. 2018. Vol. 150. P. 220–234. doi: 10.1016/j.compag.2018.04.023.
21. Zeinvand Lorestani E., Kamkar B., Razavi S. E. *Study on the effect of agricultural management factors on fungal diseases diversity indices and wheat yield in Gorgan using decision tree analysis CART* // *Cereal Research*. 2016. Vol. 6. No. 4. P. 489–505.
22. Monjezi N. *The Application of the CART and CHIAD Algorithms in Sugar Beet Yield Prediction* // *Basrah Journal of Agricultural Sciences*. 2021. Vol. 34. No. 1. URL: <https://bjas.bajas.edu.iq/index.php/bjas/article/view/318> (дата обращения: 17.10.2021). doi: 10.37077/25200860.2021.34.1.01.
23. *Use of classification and regression trees (CART) for analyzing determinants of winter wheat yield variation among fields in Poland* / M. Iwańska, A. Oleksy, M. Dacko, et al. // *Biometrical Letters*. 2018. Vol. 55. No. 2. P. 197–214. doi: 10.2478/bile-2018-0013.
24. Kalichkin V. K., Alsova O. K., Maksimovich K. Y. *Application of the decision tree method for predicting the yield of spring wheat* // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2021. Vol. 839. No. 3. P. 032042. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/839/3/032042> (дата обращения: 15.10.2021). doi: 10.1088/1755-1315/839/3/032042.

Поступила в редакцию 02.12.2021
После доработки 28.12.2021
Принята к публикации 20.01.2021